

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Školní rok: 2012/13



Definice výkonů v elektrické síti a jejich praktické aplikace

Power Definitions in Grids and their Practical Application

Diplomová práce

Řešitel: **Bc. Leoš Kukačka**

Studijní obor: 3902T005 – Automatické řízení
a inženýrská informatika

Vedoucí práce: Ing. Jan Kraus, Ph.D.

Konzultant: prof. Ing. Aleš Richter, CSc.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Školní rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Název práce:	Definice výkonů v elektrické síti a jejich praktické aplikace
Řešitel:	Bc. Leoš Kukačka
Studijní program:	N 2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika
Vedoucí práce:	Ing. Jan Kraus, Ph.D.
Konzultant:	prof. Ing. Aleš Richter, CSc.

Zadání:

- 1) Seznamte se se současnými trendy v oblasti definice činného, jalového a jiných dílčích výkonů v jedno- a tří-fázových soustavách s nelineárními zdroji a spotřebiči.
- 2) Vybrané teorie pro obecné případy zanalyzujte a konkrétní výpočty implementujte v jazyce Python.
- 3) Na zvolených příkladech z praxe demonstруйте výhody a nevýhody jednotlivých přístupů k definici elektrických výkonů.
- 4) Dosažené výsledky srovnajte, vyhodnoťte a diskutujte další možnosti využití jednotlivých teorií pro řešení praktických problémů.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Tímto děkuji své rodině a svým blízkým za podporu jak při psaní diplomové práce, tak při studiu samotném. Jmenovitě bych chtěl poděkovat vedoucímu práce dr. Krausovi. Především mu vděčím za podporu při psaní publikací a v činnostech, které jsou nad rámec běžného studia.

Abstrakt

Práce se zabývá různými definicemi elektrického výkonu. V teoretické části jsou v přiměřeném rozsahu popsány standardní definice normy IEEE 1459-2010, CPC teorie, a dále teorie, pracující s okamžitým činným a jalovým výkonem (tj. p-q, p-q-r teorie, a zobecněná teorie okamžitého jalového výkonu). Práce se také zabývá možností využití waveletové transformace v problematice analýzy elektrických výkonů.

V praktické části jsou tyto definice naimplementovány a testovány na reálně naměřených datech. Analyzovaná data obsahují jednak přechodové děje, jednak ustálené stavy různých běžných spotřebičů. Práce si kromě analýzy chování jednotlivých spotřebičů klade rovněž za cíl srovnání jednotlivých definic. Vzniklé implementace mohou nalézt své užití v hloubkové analýze dat měření kvality elektrické energie. Plánovaná je také integrace do vybraných analyzátorů kvality elektrické energie.

Klíčová slova: elektrický výkon, CPC teorie, okamžitý jalový výkon, kvalita elektrické energie

Abstract

The thesis focuses on various definitions of electric power. The theoretical part contains (described to appropriate detail) standard definitions from the norm IEEE 1459-2010, the CPC theory and also the instantaneous reactive power theories. The work touches the topic of utilising the wavelet transform for calculating electric power components.

In the practical part all the mentioned definitions are implemented and tested on real measured data. Analysed data cover transients as well as steady states of various common appliances. Apart from analysing the appliances themselves, the thesis aims also to compare the mentioned power definitions. Developed implementations can find their use in data mining on electric power quality data. The tools are also intended for integration into power quality analysers.

Key words: electric power, CPC theory, instantaneous reactive power, power quality

Obsah

Prohlášení	3
Poděkování	4
Abstrakt / Abstract	5
Obsah	6
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Seznam zkratek	11
1 Úvod	12
2 Výčet implementovaných teorií	14
2.1 Matematický aparát	14
2.1.1 Fourierova transformace	15
2.1.2 Waveletová transformace	16
2.1.3 Fortescueova metoda symetrických komponent	19
2.1.4 Clarkova transformace	20
2.1.5 Sekvence vyšších harmonických	21
2.2 Průmyslový standard IEEE 1459-2010	22
2.2.1 IEEE: 1-fázový systém bez zkreslení	23
2.2.2 IEEE: 1-fázový systém s harmonickým zkreslením	24
2.2.3 IEEE: 3-fázový systém bez zkreslení	24
2.2.4 IEEE: 3-fázový nesymetrický systém bez harmonického zkreslení	25
2.2.5 IEEE: 3-fázový nesymetrický systém s harmonickým zkreslením	26
2.3 Current's Physical Components Theory - CPC teorie	26
2.3.1 CPC: činný výkon	27
2.3.2 CPC: deformační výkony	27
2.4 Teorie okamžitého jalového výkonu (IRP)	29
2.4.1 p-q teorie	29
2.4.2 p-q teorie - úprava pro jednofázové systémy	30
2.4.3 Zobecněná teorie okamžitého jalového výkonu (GIRP)	31
2.4.4 Teorie okamžitého jalového výkonu v rotačních p-q-r souřad- nicích	31

2.5	Definice výkonů pomocí WT	32
3	Implementace	34
3.1	Zacházení se surovými oscilogramy	34
3.2	Načítání a zápis dat - knihovna DAL	35
3.3	Knihovna pro výpočet FFT	37
3.4	Tvorba grafického výstupu	38
3.5	Nástroje určené k analýze výkonů	42
3.5.1	SWA analýza, IRP analýza	43
3.5.2	CPC teorie	43
3.5.3	p-q teorie pro jednofázové systémy	44
3.5.4	DWT definice	46
4	Praktická aplikace analytických nástrojů	50
4.1	Analýza reálně naměřených hodnot	50
4.2	Optimalizace náročných výpočtů	54
5	Závěr	56
	Literatura	58
	Vlastní publikace	61
	Přílohy	62
A	Struktura uspořádání analytických modulů	62
B	Návod k použití analytických modulů	63
C	Analýza spuštění LCD monitoru - 1 fáze	65
D	Analýza výpadku jedné fáze - 3 fáze	69

Seznam obrázků

1	Ukázka spektra získaného pomocí FFT (vzorkovací frekvence $F_s = 1\,600$ Hz, zobrazeno 16 harmonických složek)	16
2	Ukázka waveletů - db2, sym8.	17
3	Ukázka WT spektra signálu, [28]	18
4	Úplný dekompoziční strom WPT (vlevo, [21]), částečný strom DWT (vpravo, [20]).	19
5	Soustava souřadnic R-S-T (na obr. značená a-b-c) a transformované souřadnice, převzato z [2].	21
6	Harmonické nulové sekvence	23
7	Rozdíl mezi zdánlivým aritmetickým a vektorovým výkonem [16].	25
8	Spuštění několika PC v učebně A-TK3 - ukázka výstupu modulu <code>graphs_3f_SWA.py</code>	39
9	Boxplotové zobrazení	40
10	Spektrogram normovaný k limitům, definovaným normou ČSN EN 50160	41
11	Ukázka polárního zobrazení 3-f napětí a proudu	42
12	Srovnání frekvenční charakteristiky spojitého a diskrétního filtru	45
13	Ukázka funkce filtru na harmonickém signálu $f = 50$ Hz	45
14	Komplexní Morletův wavelet <code>cmor50-0.05</code>	46
15	Waveletová transformace harmonického signálu o frekvencích 50, 100, 200 a 400 Hz.	48
16	Spuštění rychlovarné konvice - výkony na jednotlivých škálách CWT	48
17	Spuštění reálné zátěže - uprostřed p-q teorie, dole CPC a IEEE	50
18	Běh kancelářského ventilátoru na různých rychlostech	51
19	Zapnutí / vypnutí monitoru - 1-f analýza CPC a IEEE	52
20	PQ událost, data z [10].	53
21	Spuštění několika PC v učebně A-TK3 - srovnání CPC a IEEE, detaily zapnutí a vypnutí	54
22	Data monitor - 1f oscilogram	65
23	Data monitor - definice CWT	65
24	Data monitor - definice p-q	66

25	Data monitor - spektrogram podle PQ	67
26	Data monitor - definice p-q, polární grafy, výřez $t = 3-4$ s	67
27	Data monitor - definice IEEE a CPC, boxplot zobrazení	68
28	Data plynárna - 3f oscilogramy	69
29	Data plynárna - definice IEEE	70
30	Data plynárna - definice p-q	70
31	Data plynárna - definice p-q-r	71
32	Data plynárna - definice GIRP	71
33	Data plynárna - definice p-q, polární grafy	72
34	Data plynárna - definice p-q-r, polární grafy	72
35	Data plynárna - definice GIRP, polární grafy	73

Seznam tabulek

1	Sekvence vyšších harmonických	22
2	Přehled výkonů, definovaných v 2.2.5	26
3	Mezní hodnoty jednotlivých harmonických složek v poměru vůči první harmonické podle ČSN EN 50160	41
4	Pole předávaná výpočetními moduly	43
5	Škály a odpovídající pseudofrekvence pro wavelet cmor50-0.05 a vzorkovací frekvenci $F_s = 6\,400\text{ Hz}$	47

Seznam použitých zkratek

BSD Berkeley Source Distribution

CPC Current's Physical Components

CSV Comma Separated Values

CWT Continous Wavelet Transform, Complex Wavelet Transform

DAL Data Access Layer

DFT Discrete Fourier Transform

DWT Discrete wavelet transform

FT Fourier transform

FFT Fast Fourier transform

GIRP Generalized Instantaneous Power Theory

HGL Harmonics Generating Load

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IRP Instantaneous Reactive Power (Theory)

LF Line Feed

LTI Linear Time Invariant

PQ Power Quality

RMS Root Mean Square

SQL Structured Query Language

SWA Sliding Window Analysis

WPT Wavelet Packet Transform

WT Wavelet transform

1 Úvod

Po dobu existence elektrické rozvodné sítě byla vždy vyvíjena snaha o co nejefektivnější přenos energie z místa výroby ke spotřebiteli. Taková optimalizace vyžaduje podrobný popis jevů, ke kterým v síti dochází. Neexistuje však jednotný náhled na funkčnost sítě v netriviálních podmínkách. Tyto podmínky zahrnují kromě notoricky známého fázového posunu napětí a proudu také harmonické zkreslení napětí či proudu, a napětovou nesymetrii.

Zmíněné deformace vznikají užíváním nelineárních spotřebičů, polovodičových součástek, výbojek apod. Všechny zmíněné jevy se staví proti ideálnímu přenosu elektrické energie; v extrémním případě mohou mít negativní vliv na funkci elektrických spotřebičů. Dalším problémem jsou přechodové jevy, které vznikají spouštěním spotřebičů, popř. jinou časově proměnnou zátěží. Tyto přechodové jevy způsobují, že průběh napájecího napětí v síti není periodický, což v jistém smyslu komplikuje dokonalou analýzu.

V průběhu 20. století vzniklo mnoho teorií, které se snaží tyto jevy co nejpresněji popsat a analyzovat jejich vliv na přenos elektrické energie. Každá teorie nabízí zcela jiný přístup k definicím různých druhů elektrického výkonu. Cílem této práce je nejenom seznámit se s nejmodernějšími přístupy k definicím elektrického výkonu, ale také vytvořit sadu nástrojů, které by umožňovaly snadný výpočet těchto výkonů z průběhu naměřeného napětí a proudu.

Standardní přístup k definování základních i složitějších výkonových veličin je dostupný v **normě IEEE 1459-2010**. Další koncept, který si klade za cíl pokrýt svými definicemi veškeré možné druhy zkreslení a zároveň své definice přímo propojit s těmito fyzikálními jevy je tzv. **CPC teorie**. V řízení kompenzátorů účinníku nachází své užití tzv. **teorie okamžitého jalového výkonu** (označována písmeny p-q), která umožňuje výpočet složek výkonu v pseudoreálném čase bez použití Fourierovy transformace. Od ní jsou odvozené další dvě implementované teorie, **p-q-r teorie**, a **zobecněná teorie okamžitého jalového výkonu**. Tato práce se zabývá všemi těmito způsoby definic. Jako spíše experimentální byl dále implementován koncept využívající komplexní waveletové transformace.

V práci jsou dále tyto nástroje testovány na reálně naměřených datech, získaných jednak měřením větších elektrických obvodů s mnoha spotřebiči, jednak měřením na jednotlivých nelineárních elektrických spotřebičích. Výsledky některých zajímavých analýz jsou v práci graficky zpracovány a popsány. Ze získaných výsledků lze vyvodit závěry nejen o funkci jednotlivých spotřebičů, ale také o vlastnostech jednotlivých definic a teorií.

Kromě definic elektrického výkonu je třeba také zmínit pojem *kvality elektrické energie* (PQ). Jedná se o sadu standardizovaných doporučení ohledně kolísání hodnot napětí a jeho deformace, definovaných normou ČSN EN 50160 [5]. PQ a příslušné normy se však zabývají spíše vlivem na konečného spotřebitele, než na zefektivnění přenosu energie.

2 Výčet implementovaných teorií

Metod, jak popsat fyzikální děje vzniklé při přenosu elektrické energie, je mnoho. V zásadě je možné tyto přístupy rozdělit do dvou skupin. Některé definice agregují hodnotu výkonu za určitý interval do jedné hodnoty. V drtivé většině využívají Fourierovu transformaci (výjimkou je třeba zdánlivý, resp. činný výkon). Další možný přístup je definice tzv. okamžitého výkonu, kdy je daný výkon definovaný jako spojitá funkce času. Takové definice už z principu nemohou využívat FT a jejich pojetí jalového výkonu je poněkud odlišné od klasického vnímání. Většinou pak v sobě tento jalový výkon obsahuje i složky vzniklé zkreslením či nesymetrií.

V literatuře se značení jednotlivých matematických objektů značně liší. Pokusil jsem se toto značení pro přehlednost sjednotit. V textu jsou vektory značené klasickým způsobem, tj. \vec{x} (nikoliv tučným písmem, jak bývá v tištěné literatuře zvykem). Fázor veličiny (popř. komplexní číslo, je-li potřeba zdůraznit příslušnost do \mathbb{C}) je znázorněn stříškou \hat{X} , prosté velké písmeno značí maximální amplitudu harmonického průběhu (magnitudu fázoru). Efektivní hodnota veličiny závislé na čase je značena jako norma, tj. $\|x\|$, zatímco absolutní hodnotou $|\vec{x}|$ je značena velikost vektoru. Pro harmonický průběh tedy bude značení vypadat takto:

$$x(t) = \sqrt{2}\|x\| \cos(\omega t + \varphi) = X \cos(\omega t + \varphi) = \operatorname{Re}\{X e^{j\varphi} e^{j\omega t}\} = \operatorname{Re}\{\hat{X} e^{j\omega t}\}.$$

Fází určité harmonické složky je rozuměn fázový rozdíl napětí a proudu.

České názvosloví představuje pro některé definice problém; pro IEEE definice lze nahlédnout do [30]. Jinde bylo často potřeba pomoci si vlastní silou. V těchto případech uvádím v závorce původní anglický název veličiny.

2.1 Matematický aparát

Každá teorie pracuje s navzorkovaným napětím a proudem trochu jinak. Jsou využívány jednak nástroje ke klasické analýze signálu (FFT, DWT), jednak různé rozklady a transformace, usnadňující práci s vícerozměrnými signály (čímž ve skutečnosti tří-fázové napětí a proud jsou). V této části jsou popsány základní matematické nástroje využívané v definicích různých výkonů, zmiňovaných v této práci.

2.1.1 Fourierova transformace

Fourierova transformace je jednou z integrálních transformací. Za předpokladu, že je aplikována na periodický signál, je definována vztahem (viz [27]):

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.1.1)$$

Jedná se vlastně o skalární součin signálu s komplexní exponenciálou o různých frekvencích. Jejím výsledkem je harmonické spektrum vstupního signálu. Pro numerické výpočty je vhodnější tzv. diskrétní Fourierova transformace (DFT):

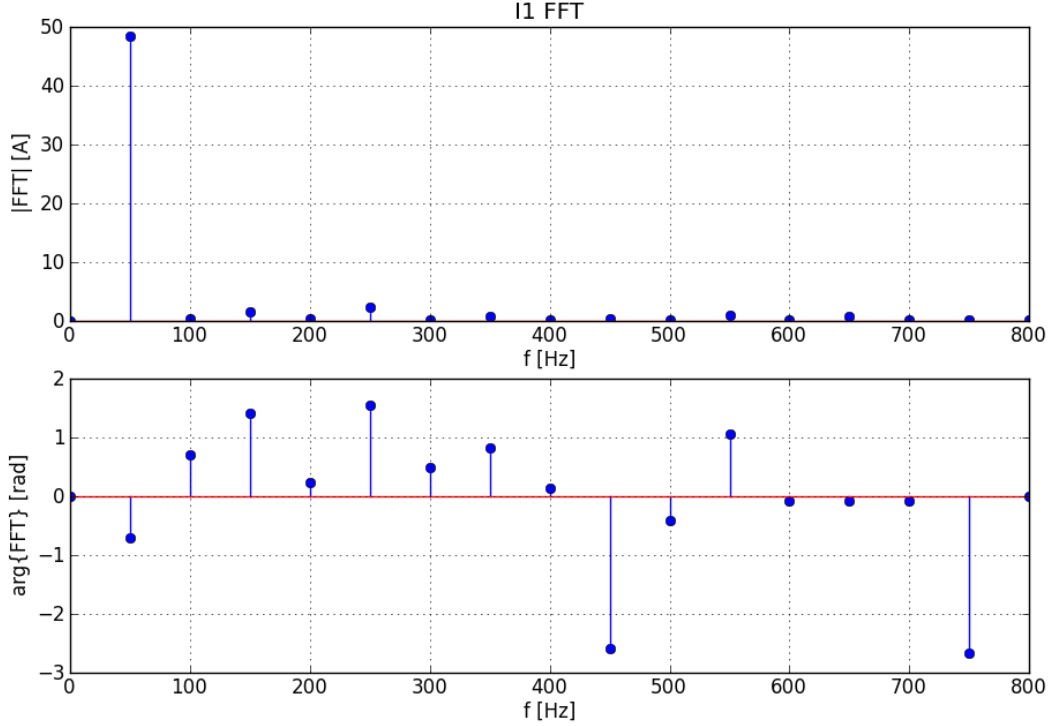
$$F(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N f(k)e^{i\omega kn/N} \quad (2.1.2)$$

Výsledkem DFT jsou fázory jednotlivých harmonických složek vstupního signálu.

Výsledné spektrum je závislé na vzorkovací frekvenci původního signálu a na počtu period, na které je transformace aplikována. Bereme-li v úvahu, že musí být dodržen tzv. vzorkovací teorém, nejvyšší frekvence, kterou můžeme pomocí DFT detekovat, je rovna polovině vzorkovacího kmitočtu F_s . Pokud jsou v signálu přítomny vyšší harmonické složky, dojde k tzv. přeložení do nižších frekvencí (aliasing); tyto kmitočty se tedy na výsledném spektru projeví, jsou však pro nás nedetekovatelné.

Spektrum získané pomocí DFT má tolik prvků, kolik bylo vzorků v analyzovaném signálu. Polovina těchto vzorků (odpovídajících záporné frekvenci) je komplexně sdruženou hodnotou odpovídajícího členu v kladné části spektra. Lze ukázat, že záporná hodnota frekvence odpovídá záporné fázi (a tedy komplexnímu sdružení fázoru), a tudíž tyto prvky nesou stejnou informační hodnotu jako kladná část spektra; tato informace je pouze rozdělena do dvou komplexních čísel. V praxi proto stačí uvažovat tzv. jednostranné spektrum. Je však vhodné amplitudy tohoto spektra vynásobit dvěma (tím se započítají přínosy prvků ze záporné poloviny spektra).

K rychlému výpočtu DFT se používá většinou jeden z několika algoritmů označovaných jako FFT (Fast Fourier Transform). Při běžném užití v textu se víceméně jedná o synonymum k DFT.



Obrázek 1: Ukázka spektra získaného pomocí FFT (vzorkovací frekvence $F_s = 1\,600$ Hz, zobrazeno 16 harmonických složek)

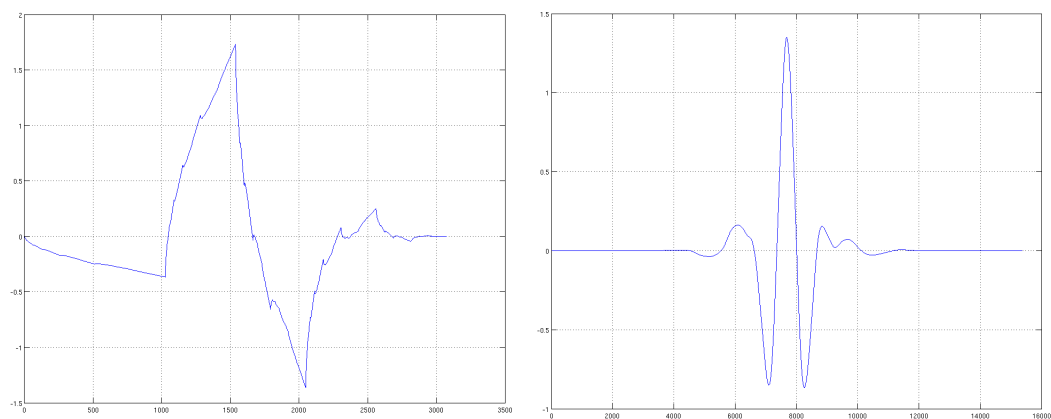
2.1.2 Waveletová transformace

Waveletová transformace je další z množiny integrálních transformací. Oproti FT používá báze funkce s kompaktním nosičem (tzv. vlnky - wavelety), při její aplikaci tedy není znehodnocena časová informace, rovněž není vyžadována periodicitu signálu. Výborný přehled o WT je poskytnut v [28]. WT je definována vztahem

$$(W_\psi f)(b, a) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (2.1.3)$$

Funkci $\psi(t)$ nazýváme *mateřským waveletem*, číslo a je tzv. *dilatace* waveletu, b je *translace* waveletu. Mateřský wavelet musí splňovat několik podmínek, zejména jeho střední hodnota musí být nulová. Výsledkem WT je dvourozměrné spektrum v časově-frekvenční oblasti (o frekvenční ose se většinou mluví jako o škále).

Důležitým bodem WT je volba waveletu. V souvislosti s daným waveletem je třeba uvést pojem počtu *nulových momentů* (*vanishing moments*), tj. takové N , pro



Obrázek 2: Ukázka waveletů - db2, sym8.

které:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^n \psi(t) dt = 0, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (2.1.4)$$

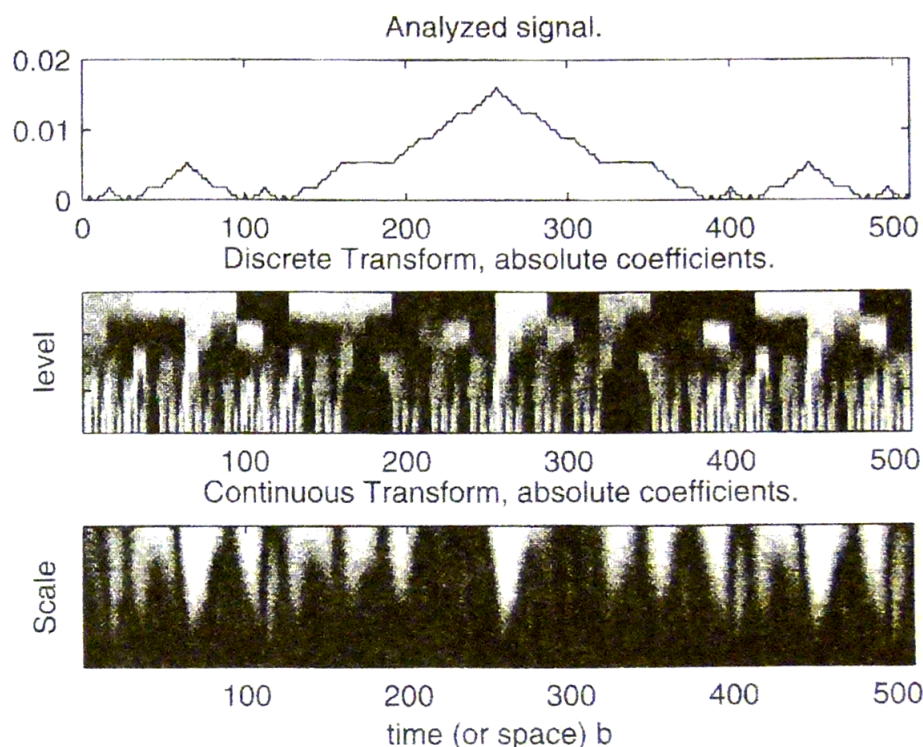
Mateřské wavelety jsou odvozovány v tzv. *rodinách*, což je množina definovaných waveletů s podobnými vlastnostmi. Nejpoužívanějšími wavelety jsou Daubechyho wavelety (značeny 'dbN', kde N označuje počet nulových momentů od 1 do 10). Wavelet 'db1' je označován jako Haarův wavelet.

Z dalších rodin je vhodné zmínit symetrické wavelety (symlety, 'sym2' - 'sym8') nebo Coifmanovy wavelety (coiflety, 'coif1' - 'coif5'). Mayerovy wavelety ('meyrN') a wavelet Mexický klobouk ('mexh') jsou odlišné od ostatních tím, že mají nosič nekonečné délky. Vhodnou volbou waveletu lze minimalizovat rozmazání spektra. Práce s komplexními wavelety je rozvedena dále v této práci.

Nejjednodušší úpravou WT pro diskrétní signály je CWT (Continuous Wavelet Transform); jedná se o vztah:

$$S(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \sum_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x), \quad (2.1.5)$$

kde a a b jsou spojitě proměnné (resp. po jednom vzorku dat). To je pochopitelně výpočetně dosti náročné. Vznikly proto dvě úpravy CWT, které pracují s redukovaným počtem koeficientů (dilatace a translace není prováděna „spojitě“, ale po blíže specifikovaných intervalech). Jde o Wavelet Packet Transform (WPT) a Discrete Wavelet Transform (DWT). Rozdíl mezi WPT a DWT dekompozicí je na obr. 4. Běžně se WPT a DWT počítají pomocí filtrace, kdy je z mateřského waveletu odvozena množina LTI filtrů, kterými je původní signál profiltrován (Mallatův algoritmus).



Obrázek 3: Ukázka WT spektra signálu, [28]

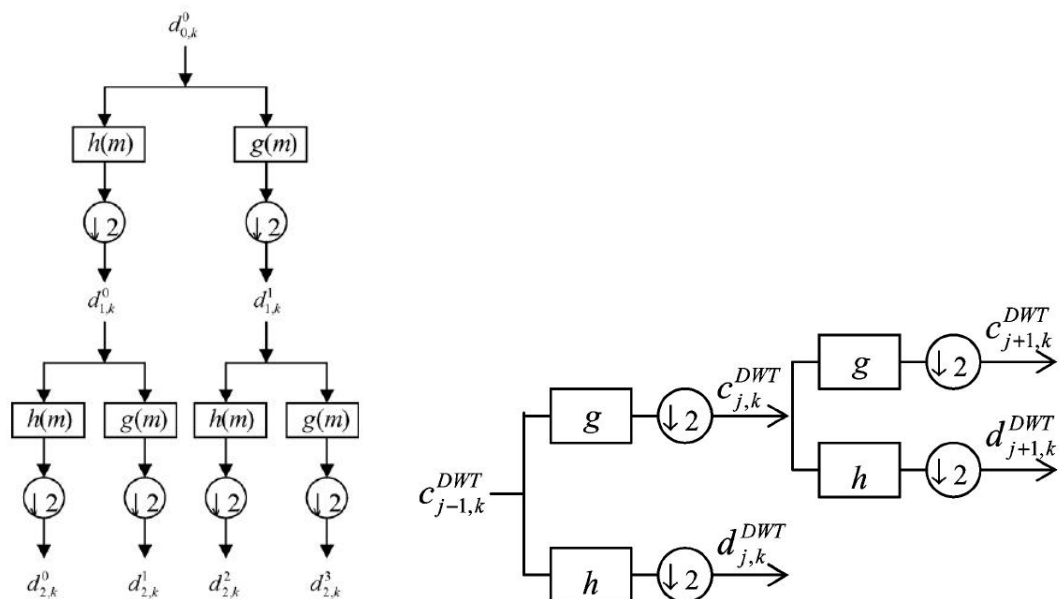
Signál je dále podroben podvzorkování a výsledkem jsou přímo koeficienty WT. Tato metoda využívá podobnosti 2.1.3 s konvolučním integrálem.

U DWT je signál vycházející z dolní propusti označován jako *aproximace* (obsahuje nejhrubší informace odpovídající nízkým frekvencím; o funkci spojené s tímto filtrem nemluvíme jako o waveletu, ale jako o *škálové funkci*). Signály, které prošly pásmovými propustěmi, se označují jako *detaily*. Počet takovýchto signálů, na které je původní signál rozložen, je stupeň dekompozice DWT.

Problematikou volby vhodného mateřského waveletu při analýze síťových jevů se zabývá [22]. Je třeba zavést pojem tzv. *střední frekvence waveletu* F_c a *pseudofrekvence waveletu* F_j . Střední frekvence waveletu je kmitočet harmonického signálu, kterým lze wavelet vhodně proložit. Pro danou škálu j a vzorkovací frekvenci F_s platí:

$$F_j = \frac{F_c F_s}{j}. \quad (2.1.6)$$

Pseudofrekvence je kmitočet, kterému odpovídají aproximační koeficienty DWT o příslušné škále. S volbou waveletu tedy také úzce souvisí volba stupně dekompozice signálu.



Obrázek 4: Úplný dekompoziční strom WPT (vlevo, [21]), částečný strom DWT (vpravo, [20]).

Další možnou úpravou WT je komplexní waveletová transformace (CWT). Vychází z užití komplexního waveletu, a tak je jejím výsledkem komplexní spektrum. Mallatův algoritmus v tomto případě používá dvojitou strukturu dekompozičního stromu (tzv. dual-tree decomposition). Tato dvojitá dekompozice může být za určitých okolností interpretována jako reálná a imaginární část spektra.

2.1.3 Fortescueova metoda symetrických komponent

Tento nástroj je používán k analýze třífázových nesymetrických systémů. Nesymetrie nastává, pokud není dodržen úhlový rozestup jednotlivých fází, či pokud mají fázory nestejnou magnitudu. Autorem této metody je C. L. Fortescue [13].

Lze ukázat, že libovolnou nesymetrickou trojici (v našem případě, neboť se zabýváme třífázovými systémy; obecně však tato metoda umožňuje pracovat s n -ticemi) fázorů lze rozložit na tři specifické trojice symetrických fázorů, které se nazývají

sousledná složka, zpětná složka a složka nulové sekvence.

$$\hat{\vec{U}}_{RST} = \begin{bmatrix} \hat{U}_R \\ \hat{U}_S \\ \hat{U}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{U}_R^0 \\ \hat{U}_S^0 \\ \hat{U}_T^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{U}_R^+ \\ \hat{U}_S^+ \\ \hat{U}_T^+ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{U}_R^- \\ \hat{U}_S^- \\ \hat{U}_T^- \end{bmatrix} = \hat{\vec{U}}^0 + \hat{\vec{U}}^+ + \hat{\vec{U}}^-, \quad (2.1.7)$$

kde $\hat{\vec{U}}^+$, $\hat{\vec{U}}^-$, $\hat{\vec{U}}^0$ jsou po řadě sousledná, zpětná a nulová složka. Pro tyto vektory fázorů platí vztahy:

$$\hat{U}_R^+ = \hat{U}^+, \quad \hat{U}_S^+ = a^2 \hat{U}^+, \quad \hat{U}_T^+ = a \hat{U}^+, \quad (2.1.8)$$

$$\hat{U}_R^- = \hat{U}^-, \quad \hat{U}_S^- = a \hat{U}^-, \quad \hat{U}_T^- = a^2 \hat{U}^-, \quad (2.1.9)$$

$$\hat{U}_R^0 = \hat{U}^0, \quad \hat{U}_S^0 = \hat{U}^0, \quad \hat{U}_T^0 = \hat{U}^0. \quad (2.1.10)$$

Každý z těchto vektorů lze tedy zastoupit jediným fázorem, \hat{U}^+ , \hat{U}^- a \hat{U}^0 . Operátor a značí pootočení komplexního čísla v Gaussově rovině o úhel $\frac{2\pi}{3} rad$ obdobně, jako operátor j je běžně používán pro otočení o $\frac{\pi}{2} rad$. Z těchto vztahů lze pro \hat{U}^+ , \hat{U}^- a \hat{U}^0 odvodit transformační matici:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}^0 \\ \hat{U}^+ \\ \hat{U}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_R \\ \hat{U}_S \\ \hat{U}_T \end{bmatrix} = A \hat{\vec{U}}_{RST} \quad (2.1.11)$$

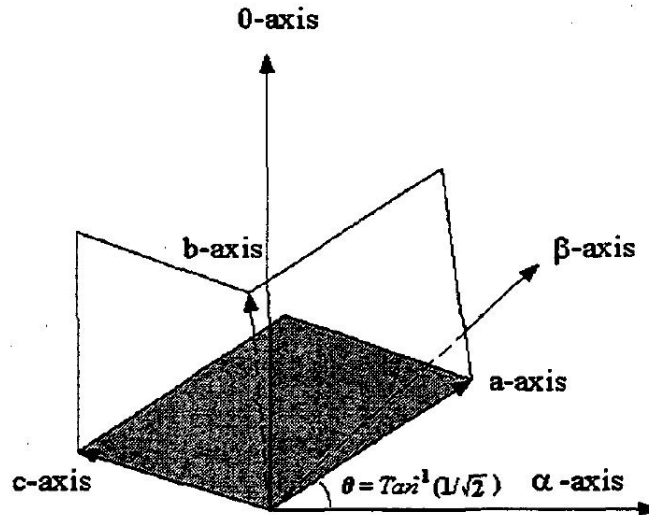
2.1.4 Clarkova transformace

Clarkova transformace [7] je používána k převodu R-S-T souřadnic (ve kterých je běžně vyjádřeno napětí a proud v třífázových soustavách) do pravoúhlých souřadnic $\alpha - \beta - 0$. Umístění původních os a os v Clarkově transformaci je na obr. 5.

$$\vec{x}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R \\ x_S \\ x_T \end{bmatrix} = C \vec{x}_{RST} \quad (2.1.12)$$

Z transformační matice C lze vidět, že jednotlivé koeficienty odpovídají hodnotám sinů a kosinů pro úhly rovnající se násobkům $\frac{2\pi}{3} rad$. Normalizační koeficient před maticí je převrácená hodnota determinantu matice.

Význam transformace spočívá v tom, že v souřadnicích $\alpha - \beta - 0$ jsou vůči sobě hodnoty α a β posunuty o úhel $\frac{\pi}{2} rad$. Vektory napětí a proudu rotují v rovině $\alpha - \beta$;



Obrázek 5: Soustava souřadnic R-S-T (na obr. značená a-b-c) a transformované souřadnice, převzato z [2].

pokud je přítomno zkreslení, nevýkreslují kružnici, ale složitější obrazec. Třetí osa značí přítomnost nulové složky (viz následující kapitola) - fyzikálně odpovídá proudu nulovým vodičem. Pokud je přítomna nulová složka, rovina, ve které rotují vektory napětí a proudu se posouvá nad, resp. pod tuto rovinu.

2.1.5 Sekvence vyšších harmonických

Jedná se o jev, jenž se vyskytuje v třífázových systémech s výskytem harmonického zkreslení s lichými harmonickými. Vzájemné fázové posunutí tří harmonických signálů se celočíselným násobením lichým číslem může otočit, či dokonce vyrovnat - takové harmonické jsou zvláště škodlivé, neboť způsobují nezanedbatelný tok proudu nulovým vodičem. Podle výsledného fázového posunutí rozlišujeme harmonické v kladné sekvenci (positive-sequence harmonics), harmonické v záporné sekvenci (negative-sequence harmonics) a harmonické nulové sekvence (zero-sequence harmonics)¹.

Na obr. 6 jsou zobrazené 1., 3. a 5. harmonická a jejich součty. Je patrné, že u 1. a 5. harmonické je jejich součet v každém okamžiku nula, zatímco u 3. harmonické dosahuje součet relativně vysokých hodnot. U třífázové sítě jde o proud, který ze

¹Je třeba dbát, aby nedošlo k záměně pojmů s Fortescueovou dekompozicí.

Tabulka 1: Sekvence vyšších harmonických

řád	fáze R	fáze S	fáze T	pořadí	sekvence
1	0	120	240	R S T	+
3	3x 0 = 0	3x 120 = 360 = 0	3x 240 = 720 = 0	—	0
5	5x 0 = 0	5x 120 = 600 = 240	5x 240 = 1200 = 120	R T S	-
7	7x 0 = 0	7x 120 = 840 = 120	7x 240 = 1680 = 240	R S T	+
9	9x 0 = 0	9x 120 = 1080 = 0	9x 240 = 2160 = 0	—	0
11	11x 0 = 0	11x 120 = 1320 = 240	11x 240 = 2640 = 120	R T S	-

systemu odteče středovým vodičem.

2.2 Průmyslový standard IEEE 1459-2010

Norma IEEE 1459-2010 [16] shrnuje klasické pojetí výkonů v jednofázových a třífázových systémech. Výkonové veličiny jsou definovány pro různé případy, kdy je uvažováno harmonické zkreslení, nesymetrie mezi fázemi, popř. kombinace obou. Výkony jsou (až na okamžitý výkon) vždy agregovaná hodnota za analyzovaný interval.

Následující definice jsou ve všech posléze zmiňovaných případech stejné. Okamžitý výkon je jediná výjimka v IEEE definicích, kdy jde o výkon jakožto funkci času (uvádím pro 1 fázi a 3 fáze):

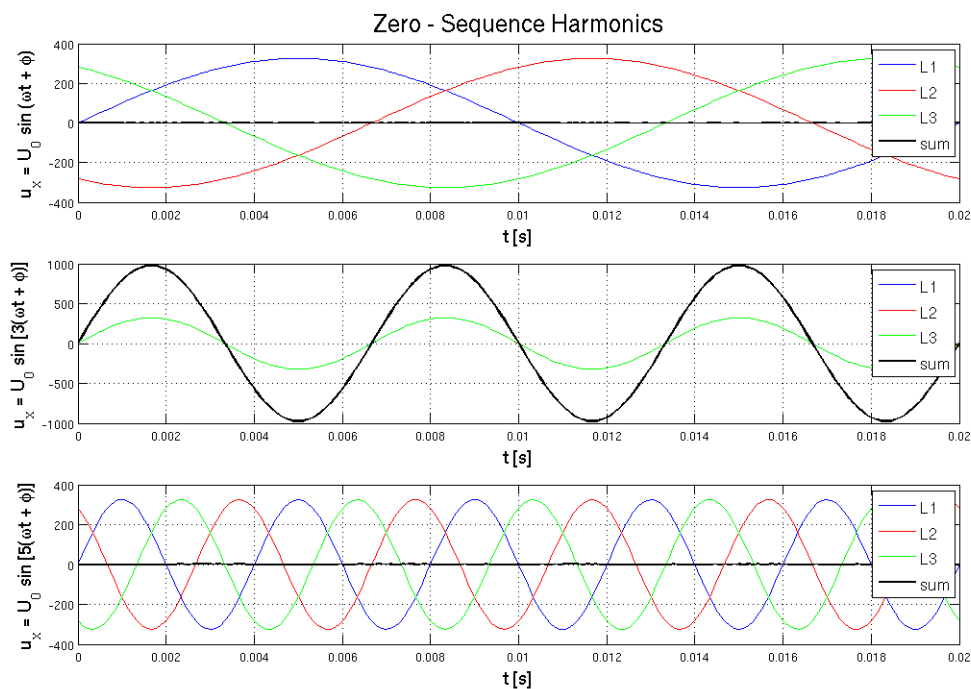
$$p(t) = u(t)i(t), \quad p(t) = \vec{u}^T(t) \cdot \vec{i}(t) = u_R(t)i_R(t) + u_S(t)i_S(t) + u_T(t)i_T(t). \quad (2.2.1)$$

Činný výkon je vlastně skalárním součinem napětí a proudu - čím mají tyto dva průběhy více společného, tím vyšších nabývá hodnot:

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p(t) dt, \quad k \in \mathbb{N}. \quad (2.2.2)$$

Zdánlivý výkon je nejobecnější výkon, který v sobě zahrnuje všechny ostatní činné i neaktivní složky (1 fáze, 3 fáze):

$$S = \|u(t)\| \|i(t)\|, \quad S = \|\vec{u}(t)\| \|\vec{i}(t)\| = \sqrt{\|u\|_R^2 + \|u\|_S^2 + \|u\|_T^2} \sqrt{\|i\|_R^2 + \|i\|_S^2 + \|i\|_T^2}. \quad (2.2.3)$$



Obrázek 6: Harmonické nulové sekvence

Poměr činného a zdánlivého výkonu je veličina zvaná účinník:

$$\lambda = \frac{P}{S}. \quad (2.2.4)$$

Účinník lze obdobně definovat i v jiných teoriích, tedy všude, kde je definován zároveň činný i zdánlivý výkon (zdánlivý výkon není samozřejmostí u IRP definic).

2.2.1 IEEE: 1-fázový systém bez zkreslení

Pro harmonický průběh platí:

$$P = \|u(t)\| \|i(t)\| \cos \varphi, \quad (2.2.5)$$

kde φ je úhel mezi fázorem proudu a fázorem napětí. Tento úhel je v podstatě jediná deformace, kterou v této kapitole připouštíme, jeho zvětšování vede k poklesu činného výkonu a nárůstu tzv. jalové složky

$$Q = \|u(t)\| \|i(t)\| \sin \varphi \quad (2.2.6)$$

Pokud bychom činný a jalový výkon rozepsali podle známého goniometrického vztahu, dostaneme

$$P^2 + Q^2 = \|u(t)\|^2 \|i(t)\|^2 (\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi) = \|u(t)\|^2 \|i(t)\|^2 = S^2, \quad (2.2.7)$$

2.2.2 IEEE: 1-fázový systém s harmonickým zkreslením

V tomto případě rozlišuje norma fundamentální činný výkon a harmonický činný výkon (norma $\|\cdot\|_1$ označuje efektivní hodnotu základní harmonické):

$$P_1 = \|u\|_1 \|i\|_1 \cos \varphi_1, \quad P_H = P - P_1 \quad (2.2.8)$$

Je zde třeba rozlišovat jalový výkon (fundamentální) a neaktivní výkon:

$$Q_1 = \|u\|_1 \|i\|_1 \sin \varphi_1, \quad N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.2.9)$$

Zdánlivý výkon je zde rozdělen do několika složek. Jde o fundamentální a nefundamentální zdánlivý výkon:

$$S_1 = \|u\|_1 \|i\|_1, \quad S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2}, \quad (2.2.10)$$

z nefundamentálního výkonu lze definovat deformační výkon proudu, deformační výkon napětí a harmonický zdánlivý výkon:

$$S_N^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2, \quad D_I = \|u\|_1 \|i\|_H, \quad D_V = \|u\|_H \|i\|_1, \quad S_H = \|u\|_H \|i\|_H. \quad (2.2.11)$$

Platí:

$$S^2 = S_1^2 + D_I^2 + D_V^2 + S_H^2. \quad (2.2.12)$$

2.2.3 IEEE: 3-fázový systém bez zkreslení

Pro činný a jalový výkon v tomto případě platí:

$$P = 3\|u_x\| \|i_x\| \cos \varphi, \quad Q = 3\|u_x\| \|i_x\| \sin \varphi, \quad (2.2.13)$$

kde x je kterákoliv fáze. Pro zdánlivý výkon po zjednodušení 2.2.3 dostaneme:

$$S = 3\|u_x\| \|i_x\|. \quad (2.2.14)$$

2.2.4 IEEE: 3-fázový nesymetrický systém bez harmonického zkreslení

V tomto případě lze definovat celkový jalový výkon jako:

$$Q_x = \|u_x\| \|i_x\| \sin \varphi_x, \quad Q = \sum_{x \in \{R, S, T\}} Q_x. \quad (2.2.15)$$

Dále standard používá Fortescuovu dekompozici k definici činného výkonu sousledné, zpětné a nulové složky:

$$P^+ = 3 U^+ I^+ \cos \varphi^+, \quad P^- = 3 U^- I^- \cos \varphi^-, \quad P^0 = 3 U^0 I^0 \cos \varphi^0, \quad (2.2.16)$$

kde $U^+ = |\hat{U}^+|$ (a obdobně pro ostatní). Podobně rovněž platí pro Q^+ , Q^- a Q^0 .

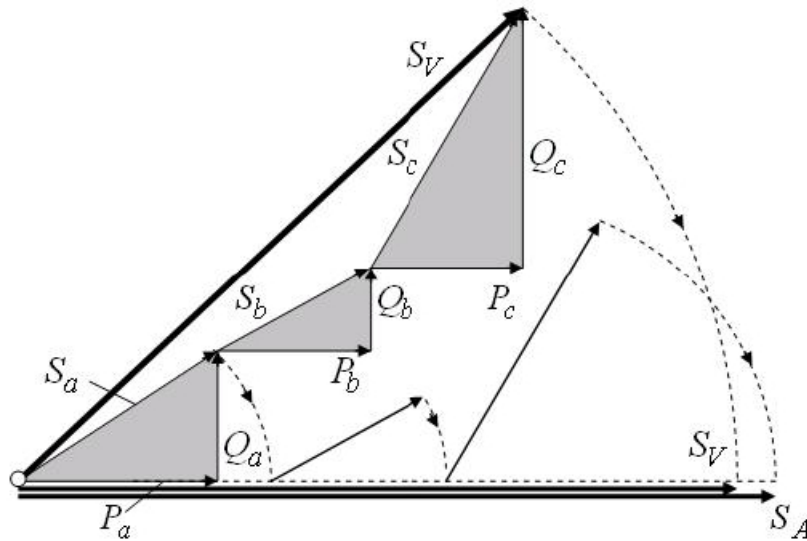
Zdánlivý výkon je zde definován dvěma způsoby; jednak existuje tzv. aritmetický zdánlivý výkon jako součet zdánlivých výkonů jednotlivých fází:

$$S_A = S_R + S_S + S_T = \sum_{x \in \{R, S, T\}} \|u_x\| \|i_x\|, \quad (2.2.17)$$

a vektorový zdánlivý výkon

$$S_V = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (2.2.18)$$

Tyto dva výkony obecně nabývají různých hodnot, platí, že $S_A \geq S_V$. Jejich rozdíl může něco málo napovědět o přítomnosti nesymetrie v systému. Grafická interpretace těchto definic je na obr. 7. Dále je zmiňován tzv. efektivní zdánlivý výkon. Jeho



Obrázek 7: Rozdíl mezi zdánlivým aritmetickým a vektorovým výkonem [16].

definice vychází z předpokladu, že k obvodu existuje obdobný symetrický obvod se stejným odběrem.

$$S_e = \sqrt{\frac{3(\|u\|_R^2 + \|u\|_S^2 + \|u\|_T^2) + \|u\|_{RS}^2 + \|u\|_{ST}^2 + \|u\|_{RT}^2}{18}} \sqrt{\frac{\|i\|_R^2 + \|i\|_S^2 + \|i\|_T^2 + \|i\|_n^2}{3}}. \quad (2.2.19)$$

Z efektivního zdánlivého výkonu lze definovat nesymetrický výkon, způsobený zpětnými a nulovými složkami:

$$S_u = \sqrt{S_e^2 - (S^+)^2}, \quad S^+ = 3 U^+ I^+. \quad (2.2.20)$$

2.2.5 IEEE: 3-fázový nesymetrický systém s harmonickým zkreslením

Toto je nejobecnější případ pro třífázové systémy. Pracuje se zde jak s Fourierovou transformací, tak i s Fortescueovým rozkladem. Složek je zde mnoho a jsou definovány povětšinou intuitivně a relevantně k již zmíněným definicím, proto uvedu pouze tabulkový přehled nejdůležitějších veličin (viz tabulka 2, popř. zdroj [16]).

Tabulka 2: Přehled výkonů, definovaných v 2.2.5

Veličina	celkový výkon	fundamentální složka	harmonická složka
zdánlivý [VA]	S_e	S_{e1}, S_1^+, S_{1u}	S_{eN}, S_{eH}
činný [W]	P	P_1^+	P_H
neaktivní [var]	N	Q_1^+	D_A, D_{eV}, D_{eH}
harmonické zkreslení			S_{eN}/S_{e1}
nesymetrie		S_{1u}/S_1^+	

2.3 Current's Physical Components Theory - CPC teorie

CPC teorie používá k definicím výkonů jiný přístup než IEEE. Autor této teorie, prof. L. S. Czarnecki tvrdí, že - narozdíl od standardních definic - se výskyt jednotlivých složek výkonů dá vysvětlit fyzikálně identifikovatelnými jevy. CPC teorie je rozšířením Fryzeho teorie [12], používá však k rozkladu Fourierovu transformaci, kterou S. Fryze pod dojmem neúspěchu C. Budeanuových definic [6] zavrhoval (viz též [9, 14]).

S. Fryze použil k definici činného a neaktivního výkonu rozklad proudu na ortogonální složky. Pracuje s pojmem tzv. ekvivalentní vodivosti, což je hodnota zátěže potřebná k tomu, aby obvodem tekla stejný proud, ale byl spotřebováván pouze činný výkon. L. S. Czarnecki tento rozklad rozšířil a namísto dvou složek proudu (a výkonu) jich definuje pět. K tomu je však potřeba znát dobře analyzovanou zátěž.

2.3.1 CPC: činný výkon

Při prvním zkoumání [8] se lze domnívat, že CPC teorie vlastně činný výkon nedefinuje. Činný výkon v je CPC počítán z efektivní hodnoty činné složky proudu, činná složka proudu je určena s pomocí ekvivalentní vodivosti G_e , jež je definována pomocí činného výkonu:

$$G_e = \frac{P}{\|u\|^2}. \quad (2.3.1)$$

Ve skutečnosti jde o kruhovou definici pouze zdánlivě. Pro výpočet je opravdu potřeba sáhnout k definici činného výkonu v 2.2.2, aby bylo možné určit hodnotu G_e . Odtud lze získat činnou složku proudu a zpětně činný výkon:

$$i_a(t) = \text{Re}\left\{ \sum_{n \in N} G_e \hat{U}_n e^{j\omega n t} \right\}, \quad P = \|u(t)\| \|i_a(t)\|, \quad (2.3.2)$$

takto získaný činný výkon ale není totožný s 2.2.2. Dosahuje sice většinou stejných hodnot, je však vždy nezáporný. Z dalších definic CPC vyplývá, co se děje, když by měl být činný výkon záporný.

2.3.2 CPC: deformační výkony

Pohled na jalový výkon je u CPC podobný jako u IEEE. Jedná se o neúčinný výkon, který je přítomný, pokud existuje nenulový fázový rozdíl mezi napětím a proudem. V definici jde však CPC k původu tohoto posunutí - zátěž se nechová jako reálný odpor, ale má komplexní admitanci $\hat{Y} = G + jB$. Jalový proud a *jalový výkon* je pak definován takto:

$$i_r(t) = \text{Re}\left\{ \sum_{n \in N} jB \hat{U}_n e^{j\omega n t} \right\}, \quad Q = \|u(t)\| \|i_r(t)\|. \quad (2.3.3)$$

Je opět patrné, že jalový výkon bude vždy nezáporný; to bohužel u CPC znemožňuje rozlišit mezi kapacitní a induktivní zátěží.

První z deformačních složek, která je v CPC definována, je tzv. *roztroušený výkon* (*scattered power*). Vzniká, pokud se reálná složka obecně komplexní admitance mění s frekvencí:

$$i_s(t) = \text{Re}\left\{ \sum_{n \in N} (G_n - G_e) \hat{U}_n e^{j\omega n t} \right\}, \quad D_s = \|u(t)\| \|i_s(t)\|. \quad (2.3.4)$$

Generovaný výkon je složka dodávaná zátěží do sítě. Jde buď o zkreslení, které se nevyskytuje na napětí, ale pouze na proudu, anebo o celou harmonickou složku i s napětím, jež ovšem nese záporný činný výkon. Je proto třeba roztrdit harmonické složky do množin (značíme D a C) podle znaménka činného výkonu:

$$\cos \varphi_n < 0 \quad \forall n \in C, \quad \cos \varphi_n \geq 0 \quad \forall n \in D. \quad (2.3.5)$$

Generovaný proud a výkon je pak sestaven:

$$i_C(t) = \text{Re}\left\{ \sum_{n \in C} \hat{I}_n e^{j\omega n t} \right\}, \quad S_C = \|u(t)\| \|i_C(t)\|. \quad (2.3.6)$$

Pokud uvažujeme přítomnost generovaného výkonu, je u ostatních definic potřeba množinu vyšších harmonických složek zaměnit z N na D.

Přeřazením celé harmonické do generovaného výkonu přicházíme o informaci o hodnotě admitance příslušící této harmonické. Tato harmonická složka stále může být nositelem jalového či roztroušeného výkonu, nemáme však žádnou možnost se o tom dozvědět. Proto pro tuto složku výkonu používám značení S_C , má totiž charakter zdánlivého výkonu.

V předchozích definicích jsme dosud uvažovali jednofázový systém. Stejně definice platí i pro trojfázový systém se symetrickým napětím i zátěží, pouze je potřeba namísto skalární hodnoty napětí a proudu uvažovat vektory napětí

$\vec{u}(t) = [u_R(t) \ u_S(t) \ u_T(t)]^T$ (a podobně u proudu). Celková efektivní hodnota trojfázové veličiny se spočítá jako

$$\|\vec{u}(t)\| = \sqrt{\|u_R(t)\|^2 + \|u_S(t)\|^2 + \|u_T(t)\|^2}. \quad (2.3.7)$$

Rozvážený deformační výkon je přítomný, pokud uvažujeme nesymetrické napájení. Je však třeba zmínit, že CPC teorie byla doposud definována pouze pro třífázové systémy s trojúhelníkovou konfigurací. Jak zjistíme v kapitole o implementaci, v praktickém použití to značí vcelku podstatnou překážku.

Než přistoupíme k definici rozvážené složky proudu, je potřeba nadefinovat tzv. rozváženou admitanci a zpětný vektor fázoru napětí:

$$\hat{A} = -(\hat{Y}_{ST} + \alpha \hat{Y}_{RT} + \alpha^2 \hat{Y}_{RS}), \quad \hat{U}^\# = [\hat{U}_R \ \hat{U}_T \ \hat{U}_S]^T. \quad (2.3.8)$$

Pak definujeme *rozvážený výkon*:

$$\vec{i}_u(t) = Re\left\{ \sum_{n \in N} A \hat{U}_n^\# e^{j\omega n t} \right\}, \quad D_u = \|\vec{u}(t)\| \|\vec{i}_u(t)\|. \quad (2.3.9)$$

2.4 Teorie okamžitého jalového výkonu (IRP)

Tato skupina teorií definuje výkon jako funkci času (okamžitý výkon, odtud IRP - Instantaneous Reactive Power Theory). Vznikly především z potřeby řídit v pseudoreálném čase kompenzátory jalového výkonu. Jsou proto jednoduché a nenáročné na výpočetní výkon. Na rozdíl od standardních definic a CPC pracují vždy s jedním aktuálním vzorkem vstupních dat (proto v těchto definicích pro přehlednost vynechávám zdůraznění, že jde o funkci času, tj. namísto $u(t)$ je použito jen u apod.).

2.4.1 p-q teorie

První z teorií okamžitého jalového výkonu, p-q teorie (původně, a v některé literatuře dosud označována jako IRP - ve své práci však tuto zkratku raději používám pro celou skupinu teorií) byla publikována H. Akagim v r. 1984 [1].

p-q teorie pracuje původně s neúplnou Clarkovou transformací (viz 2.1.4) - je vynechána nulová složka. V Clarkově transformaci odpovídá nulová složka přítomnosti proudu středovým vodičem (jsou přítomny harmonické nulové sekvence - viz 2.1.5). Proto původní p-q nutně předpokládá, že tyto harmonické přítomny nejsou. Transformace napětí (a pochopitelně i proudu) probíhá takto:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{3} & -\frac{\sqrt{2}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_R \\ u_S \\ u_T \end{bmatrix} \quad (2.4.1)$$

H. Akagi pak definuje okamžitý činný výkon (po normalizaci shodný s okamžitým

výkonem v 2.2.1):

$$p = u_\alpha \cdot i_\alpha + u_\beta \cdot i_\beta = \sqrt{\frac{3}{2}}(u_R i_R + u_S i_S + u_T i_T). \quad (2.4.2)$$

Okamžitý jalový výkon (instantaneous imaginary power) je pak definován jako velikost vektoru vzniklého vektorovým součinem křížových členů - tento vektor je kolmý na rovinu $\alpha - \beta$:

$$q = |\vec{q}| = |u_\alpha \times i_\beta + u_\beta \times i_\alpha| = u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha. \quad (2.4.3)$$

Akagiho p-q teorie nepracuje s pojmem zdánlivý výkon.

Dodatečně (v diskuzi pod článkem [1]) byl dodefinován i okamžitý výkon nulové složky tak, aby definice odpovídala kompletní Clarkově transformaci (viz kap. 2.1.4):

$$p_0 = u_0 i_0. \quad (2.4.4)$$

2.4.2 p-q teorie - úprava pro jednofázové systémy

Protože původní Akagiho p-q teorie pracuje pouze na 3-fázových systémech, vzniknul způsob, jak p-q uplatnit rovněž na 1-fázovém obvodu [15]. Principiálně je možné definovat okamžité výkony stejným způsobem jako v předešlé kapitole, pokud okamžitou hodnotu napětí a proudu v analyzované fázi ztotožníme s osou alfa v Clarkově transformaci. Je však potřeba vyřešit, jak lze získat signál odpovídající ose beta, tj. posunutý o $\frac{\pi}{2} \text{ rad}$.

V [15] autoři navrhnou k tomuto účelu použít tzv. Hilbertovu transformaci [17]. Je definována vztahem

$$\hat{f}(t) = \frac{1}{2\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2.4.5)$$

Její podrobnější rozbor je mimo rozsah této práce. Je pouze potřeba zmínit, že její aplikace umožňuje snadné otočení signálu o požadovaný úhel, je však nekauzální. Nekauzalita znemožňuje její užití v online analýze; v našem užití by snad neměla být na obtíž, nicméně otočení fáze signálu je v naší analýze naimplementováno stejným způsobem, jako v [15].

Autoři navrhnou Hilbertovu transformaci aproximovat spojitým filtrem s přenosem (v Laplaceově transformaci):

$$H(s) = -\frac{1 - T_1 s}{1 + T_1 s}, \quad (2.4.6)$$

kde $T_1 = \frac{1}{2\pi f}$. Signály $u_\beta(t)$ a $i_\beta(t)$ lze získat tím, že na vstup tohoto filtru přivedeme signály $u_\alpha(t)$ a $i_\alpha(t)$. Okamžitý činný a jalový výkon pak lze definovat stejně jako v 3-fázovém p-q, tj. vztahy 2.4.2 a 2.4.3.

2.4.3 Zobecněná teorie okamžitého jalového výkonu (GIRP)

Na rozdíl od Akagiho definují autoři [25] okamžitý činný a jalový výkon bez použití Clarkovy transformace (což mj. dále snižuje výpočetní náročnost a umožňuje, že tato teorie platí za jakýchkoliv deformačních podmínek). Teorii nazvali Generalized Instantaneous Power Theory (GIRP). Činný výkon je zde definovaný stejně jako okamžitý výkon v IEEE definicích (viz kap. 2.2.1, vzorec 2.2.1). U okamžitého jalového výkonu je namísto skalárního součinu použit vektorový součin veličin:

$$q = |\vec{q}| = |\vec{u} \times \vec{i}|. \quad (2.4.7)$$

Absolutní hodnota vektorového součinu je přímo úměrná ploše sevřené dvěma vektory. GIRP také definuje okamžitý zdánlivý výkon:

$$s = |\vec{u}| |\vec{i}|. \quad (2.4.8)$$

2.4.4 Teorie okamžitého jalového výkonu v rotačních p-q-r souřadnicích

Autor původní p-q teorie, H. Akagi, později zveřejnil tzv. p-q-r teorii [2]. Hodnoty veličin jsou odečítány na soustavě souřadnic $p-q-r$, která rotuje společně s fázory napětí a proudu. Hlavní osa této soustavy p je v prostoru vždy souhlasně orientována s okamžitou pozicí vektoru napětí v $\alpha - \beta - 0$ souřadnicích. Odvození transformace je poněkud zdlouhavé (jedná se o postupné otáčení soustavy souřadnic v prostoru podle jednotlivých os o časově proměnný úhel), proto čtenáře odkáží na původní

zdroj [2] a uvedu zde pouze výslednou transformaci:

$$\vec{i}_{pqr} = \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_\alpha}{u_{\alpha\beta 0}} & \frac{u_\beta}{u_{\alpha\beta 0}} & \frac{u_0}{u_{\alpha\beta 0}} \\ -\frac{u_\beta}{u_{\alpha\beta}} & \frac{u_\alpha}{u_{\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{u_0 u_\alpha}{u_{\alpha\beta} u_{\alpha\beta 0}} & -\frac{u_0 u_\beta}{u_{\alpha\beta} u_{\alpha\beta 0}} & \frac{u_{\alpha\beta}}{u_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} C \vec{i}_{RST}, \quad (2.4.9)$$

kde

$$u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}, \quad u_{\alpha\beta 0} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2}. \quad (2.4.10)$$

Osy p , q a r jsou na sebe navzájem kolmé a rotují společně s vektorem napětí \vec{u} . Na ose p sledujeme okamžitý činný výkon, na zbylých dvou osách odečítáme jalové výkony $q_q(t)$ a $q_r(t)$. Protože je osa p vždy souhlasná s vektorem napětí, lze pro výkony odvodit:

$$\begin{bmatrix} p \\ q_q \\ q_r \end{bmatrix} = u_p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \vec{i}_{pqr}, \quad u_p = |\vec{u}_{RST}|. \quad (2.4.11)$$

p-q-r teorie zavádí také okamžitý zdánlivý výkon (totožný se zdánlivým výkonem z kap. 2.4.3):

$$s(t) = |\vec{u}_{RST}(t)| |\vec{i}_{RST}(t)| = |\vec{u}_{\alpha\beta 0}| |\vec{i}_{\alpha\beta 0}| = u_p |\vec{i}_{pqr}| = \sqrt{p^2 + q_q^2 + q_r^2}. \quad (2.4.12)$$

2.5 Definice výkonů pomocí WT

Téma definice výkonů za pomoci waveletové transformace je široké, viz např. [11, 20, 21, 23]. Autoři většinou tuto snahu motivují zachováním časového rozlišení definic v kombinaci s rozlišením harmonických složek. Přesně to waveletová transformace umožňuje.

Základní pojmy ze standardu IEEE 1459-2010 lze pomocí DWT definovat takto [11]:

$$P = \frac{1}{2^N} \left(\sum_{k=0}^{2^{j_0}-1} c_{j_0,k} d_{j_0,k} + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} \sum_{k=0}^{2^{j_0}-1} c_{j,k} d_{j,k} \right), \quad (2.5.1)$$

$$Q = \frac{1}{2^N} \left(\sum_{k=0}^{2^{j_0}-1} c_{j_0,k} d'_{j_0,k} + \sum_{j \geq j_0}^{N-1} \sum_{k=0}^{2^{j_0}-1} c_{j,k} d'_{j,k} \right), \quad (2.5.2)$$

kde c a d označují koeficienty proudu (resp. napětí), d' označuje koeficienty napětí posunutě o $\frac{\pi}{2}$ rad. Obdobně jsou v [23] definovány P^+ , S^+ , S_e , S_u , D_{eI} , D_{eV} , S_{eN} a

Q^+ (a další v [20, 21]). Tyto definice však nemají přílišný praktický význam; oproti IEEE nepřináší nic nového, správný výpočet je závislý na vhodné volbě waveletu a řádu dekompozice (tato problematika viz [22]), zároveň je třeba vyřešit problém otočení signálu (což by šlo např. vyřešit stejným způsobem jako v 2.4.2, tedy all-pass filtrem). Hlavní výhoda WT, a sice zachování časové informace, je zde nevyužita.

Autoři [11] proto dále navrhují definovat okamžitý činný a jalový výkon pomocí komplexní DWT. Jejím výsledkem jsou komplexní koeficienty (obdoba fázorů z FT), z jejichž fáze lze vyčíst informaci o přítomnosti jalového výkonu:

$$\hat{U}_W(t, s) = U_W(t, s) e^{\alpha(t, s)}, \quad \hat{I}_W(t, s) = I_W(t, s) e^{\beta(t, s)}, \quad \varphi(t, s) = \alpha(t, s) - \beta(t, s). \quad (2.5.3)$$

Je třeba mít na paměti, že při analýze výkonů nemusí mít komplexní waveletové spektrum přímé reálné opodstatnění. Aby magnituda a argument komplexního čísla zastávaly stejnou funkci jako u FT, je třeba imaginární část waveletu definovat vhodným způsobem. Autoři citovaného článku [11] tento problém nikterak nezmiňují. I z vhodným způsobem vytvořeného spektra je však třeba pro snadnou interpretaci spočítat okamžitý výkon. Okamžitý činný a jalový výkon fundamentální harmonické jsou definovány:

$$p(t, s_f) = U_W(t, s_f) I_W(t, s_f) \cos \varphi(t, s_f), \quad q(t, s_f) = U_W(t, s_f) I_W(t, s_f) \sin \varphi(t, s_f). \quad (2.5.4)$$

Takto lze pochopitelně definovat okamžité výkony i pro jiná frekvenční pásma, je však třeba mít na paměti, že různá pásma v DWT nekorrespondují přímo s frekvencemi u DFT - záleží na stupni dekompozice signálu. U WT je rovněž problém s rozmazáním spektra. K této analýze je vhodný např. komplexní Morletův wavelet nebo komplexní Gaussův wavelet.

3 Implementace

V rámci DP byla naimplementována knihovna pro provádění požadovaných výpočtů. Program byl psán v programovacím jazyce Python v2.7 [26]. Tento jazyk byl zvolen pro svou jednoduchost a snadnou přenositelnost mezi platformami. Pro manipulaci s daty a některé matematické operace je použita knihovna NumPy, volně dostupná pod BSD licencí [24]. Pro vykreslování grafů je použita knihovna Matplotlib, rovněž dostupná pod BSD kompatibilní licencí.

Zdrojové kódy jsou organizovány do jednotlivých souborů - modulů, podle toho, kterou část problému řeší. Jednak jsou to knihovny `FFT.py` a `DAL.py`, dále pak přímé výpočty. Každý výpočet je nadefinovaná funkce, která je volána z mateřského skriptu. Každý modul má nutně příponu `.py`, a dále je uveden hlavičkou. Hlavička obsahuje typicky tzv. hashbang, tj. řádek, určující, který interpreter se má pro spuštění skriptu zvolit (tedy např. `#!/usr/bin/python2 -O`). Dále je zde stručný komentář, co modul obsahuje, a jsou načteny potřebné další moduly, popř. knihovny.

Zmíněný mateřský skript je pak program, kde se volí název souboru se zdrojovými oscilogramy a jsou zvoleny teorie, kterými se mají vstupní data analyzovat. Tento skript dále výsledná data uloží do textového souboru ve formátu CSV s příponou, která napovídá, jaká z teorií byla použita k analýze. Celková struktura, do které jsou moduly organizovány, je v příloze A.

3.1 Zacházení se surovými oscilogramy

Pro práci se surovými oscilogramy je používáno prostředí ENVIS firmy KMB systems. Surové oscilogramy jsou z měřicích přístrojů načítány pomocí programu ENVIS-Daq. Program data extrahuje buď do nainstalovaného SQL serveru, nebo do zvláštních komprimovaných archivů ve formátu CEA. Odtud je možné v prostředí ENVIS data exportovat do binárních souborů XLS, popř. do textového formátu CSV. Velmi dlouhá data jsou rozdělena do více souborů, aby jeden soubor neobsahoval více než 1 minutu záznamu (i tak dosahují XLS soubory velikostí okolo 50 MB). Dělení velkých souborů má své opodstatnění z hlediska využití operační paměti.

Formát CEA je proprietární binární formát pro ukládání dat načtených z měřicích přístrojů. Jedná se o zip archiv se složitou vnitřní binární strukturou. Metody k práci s tímto formátem jsou integrovanou součástí prostředí ENVIS. Formát CEA je proto nevhodný pro užití analyzačními nástroji, které jsou vyvíjené v rámci této diplomové práce. Proto je nutné všechna surová data pomocí programu ENVIS exportovat ze souboru CEA do některého z formátů XLS nebo CSV.

XLS je rovněž binární soubor, používaný systémem Microsoft Office. Pro svou rozšířenost se stal jakýmsi standardem pro tabulková data. Tabulky XLS lze rovněž otevřít a editovat pomocí volně dostupného kancelářského balíku LibreOffice (popř. OpenOffice). Pro načítání surových dat z XLS souborů do prostředí jazyka Python je použit zvláštní skript `ReadAllData.py`, dodaný vedoucím práce.

Formát CSV je čistě textový formát. CSV nemá žádnou jednotnou specifikaci, název (comma separated values) však napovídá, že podle konvence jsou jednotlivá čísla (převedená do ASCII interpretace) oddělena čárkou (někdy středníkem). Nový řádek je klasicky indikován odřádkováním - zde lze narazit na problémy spojené s užitím na různých platformách (OS Windows používá poněkud odlišný symbol pro odřádkování než např. OS GNU/Linux). Pro načítání CSV souborů byla použita knihovna `csv`, volně dostupná v prostředí jazyka Python. Tato knihovna je schopná pracovat s CSV soubory s nejrůznějšími znaky použitými k oddělení číselných hodnot a odřádkování.

3.2 Načítání a zápis dat - knihovna DAL

Pro načítání vstupních dat byla vytvořena abstrakční vrstva Data Access Layer (DAL). Obsahuje v současné době 12 funkcí určených převážně k zpřístupnění dat buď z tabulek XLS nebo ze souborů ve formátu CSV. Co se týče formátu XLS, prostředí ENVIS provádí export v několika různých formátech tabulky podle typu přístroje, ze kterého bylo měření načteno. Pro každý formát je třeba vytvořit zvláštní funkci. Je proto celkem časté, že je pro nějaký zdroj dat nutné napsat novou funkci.

Všechny funkce určené k načítání oscilogramů vrací data ve formátu $[F \ S \ U \ I]$, kde F s je vzorkovací frekvence, U a I jsou pole obsahující navzorkované napětí, popř.

proud. Hranatými závorkami je myšlen zvláštní formát pole užívaného v jazyce Python, nazývané n-tice („tuple“) - oproti klasickému poli může n-tice obsahovat prvky různých datových typů (i další n-tice). Pokud se jedná o třífázová data, jsou předávána ve formátu `[Fs [U1 U2 U3] [I1 I2 I3 In]]`. Tam, kde je to vhodné, jsou data převedena z n-tice do formátu pole užívaného knihovnou NumPy.

Název každé funkce je zakončen příponou, která indikuje, zda funkce načítá data ze souboru CSV nebo XLS, dále jedná-li se o jednofázová nebo třífázová data. Např. funkce určená k načtení třífázových dat exportovaných z přístroje SMPQ do souboru XLS má název `SMPQdata_xls3f()`. K některým těmto funkcím ještě existují nadstavby, které spojují dohromady data, která jsou před načtením rozdělena do několika souborů (viz kap. 3.1). Jednou z takových nadstaveb pro načítání je např. funkce `JoinSMPQdata_xls3f()`. Argumenty předávané těmto funkcím je jednak řetězec, obsahující název prvního ze sady souborů, a dále pole, obsahující informaci o délce souborů, které mají být načteny.

Kromě načítání dat tato knihovna umožňuje generovat data požadovaných parametrů. K tomu jsou určeny funkce `Generate_1f()` a `Generate_3f()`. Jako parametr berou vzorkovací frekvenci, fundamentální síťový kmitočet, počet period, seznam vyšších harmonických (pokud je kolekce prázdná, žádné zkreslení generované není), fázový rozdíl mezi napětím a proudem, popř. u třífázové verze ještě boolovskou proměnnou indikující, zda má být generovaný signál symetrický, či nikoliv.

Další důležitou funkcí v této knihovně je `Write2CSV()`, která zapisuje spočítané hodnoty výkonů do textového souboru v CSV formátu. K oddělení číselných hodnot je použit středník, zařádkování je značeno způsobem typickým pro GNU/Linux, tj. znakem 'LineFeed' (LF). Výstupní textový soubor obsahuje vždy výkony, spočtené podle jedné z teorií, a podle toho je opatřen příslušnou příponou, popř. u jednofázových výpočtů také číslem, indikujícím ze které fáze data pocházejí. Poslední funkce v knihovně DAL je `ReadPowersCSV()`. Načítá již spočtené průběhy výkonů, které jsou uloženy v textovém souboru v CSV formátu (zapsané funkcí `Write2CSV()`).

Předmětem diskuze může být ukládání dat - jak surových oscilogramů, tak spo-

čítaných průběhů výkonů na pevný disk. Při načítání dat z XLS či CSV formátu není zohledněno časové umístění měření (informace o konkrétním datu a času, kdy naměřená událost proběhla). Nevýhodou tohoto přístupu je, že je vždy třeba načíst celý oscilogram. To není na překážku při analýze, ovšem při tvorbě grafů by stačilo načíst alespoň přibližně interval, který má být vykreslen.

Z téhož důvodu není časová informace dostupná ani ve výstupním CSV souboru, který obsahuje spočtené výkony. Tyto výstupní soubory rovněž nejsou nijak děleny a pokud je veličin mnoho (např. IEEE definice), mohou dosahovat velikostí řádově až stovek MB.

3.3 Knihovna pro výpočet FFT

Nejjednodušší a často používané rutiny byly přemístěny do samostatného souboru, nazvaného `functionals.py`. Jsou zde umístěny výpočty skalárního součinu dvou signálů (činný výkon), efektivní hodnoty signálu, velikost vektoru nebo geometrického součtu sady hodnot. Některé tyto úkony se implementačně shodují, proto na sebe často pouze navzájem odkazují. Několiké pojmenování pro stejný výpočet je účelné pro zpřehlednění kódu.

Pro počítání FFT je použita funkce z knihovny NumPy. Kvůli nutné úpravě spektra však vznikla nadstavba, obsahující potřebné funkce (modul `fft_lib.py`). Spektrum signálu je zde zpracováno tak, aby výsledkem byly přímo fázory jednotlivých harmonických složek. Předně je násobeno dvěma a normováno koeficientem $\frac{1}{N}$. Odpadá tak potřeba jakkoliv normovat hodnoty při ručním skládání harmonických (viz 2.3 - ve mnou užívaných vzorcích chybí oproti [8] násobení $\sqrt{2}$ právě z tohoto důvodu). Vstupní data nejsou nijak okénkována (resp. jde o obdélníkové okénko). Funkce `GetHarmsFromSpectrum()` zajišťuje výběr pouze těch prvků ze spektra, které odpovídají celočíselným násobkům fundamentální frekvence.

Pokud byla pro výpočet FFT použita pouze jedna fundamentální perioda, nejsou k dispozici žádné informace o meziharmonických složkách; prvky jednostranného spektra přímo odpovídají celočíselným násobkům základního kmitočtu. Výběrem vyšších harmonických nedochází ke ztrátě informace (vyšší harmonické, než $F_s/2$,

jsou vlivem aliasingu přeloženy do nižších, obdobně meziharmonické). Pokud je k FFT použito více period, je k dispozici také více vzorků na frekvenční ose, a tudíž lze vyčíst rovněž informace o meziharmonických složkách. Pokud je použit přesně celočíselný násobek periody, nemělo by dojít k tzv. rozmazání spektra. Výběrem vyšších harmonických ztrácíme informaci o meziharmonických složkách.

3.4 Tvorba grafického výstupu

K tvorbě grafů bylo vytvořeno několik samostatných skriptů, nezávislých na výše popsané struktuře. Tyto skripty pouze používají funkce z knihovny DAL k získání jednak surových oscilogramů, jednak k načtení již spočítaných průběhů výkonů. Veškeré skripty obsluhující grafický výstup obsahují možnost vybrat si a zobrazit jakkoliv dlouhý časový úsek. Začátek a konec výřezu jsou zadávány v sekundách (0 - začátek načtených dat; -1 zadaná jako konec zobrazovaného intervalu způsobí vykreslení grafu až do konce dat).

V první řadě je možné zobrazit do grafu surové oscilogramy jednak jednofázových, jednak třífázových dat (k tomu slouží moduly `plot_GO_1f.py` a `plot_GO_3f.py`). Dále je možné zobrazit do společného grafu průběh výkonů podle IEEE a CPC (v jedné fázi). V tomto zobrazení lze přiblížit dvě libovolná místa z celého průběhu a zobrazit jak jejich oscilogram, tak i spočítaný průběh vybraných výkonových složek. Ukázka takového grafu je na obrázku 19; modul, který generuje takovýto výstup, je pojmenován `CPCxIEEE_SWA.py`.

Další skupina jednoduchých skriptů umožňuje zobrazit do společné osy činný, jalový a zdánlivý výkon podle volitelných definic. Tak je možné mezi sebou jednotlivé definice snadno porovnávat. Skripty jsou celkem čtyři, neboť je odlišná implementace zobrazení okamžitých výkonů a výkonů získaných SWA; podobně se liší 1-f a 3-f výkony. Výstupem je např. obrázek 21, získaný modulem `graphs_3f_SWA.py`. Nevýhoda tohoto zobrazení je, že zohledňuje pouze základní složky - P, Q a S. Je v principu sice možné snadno zobrazit i jiné složky, účelem těchto grafických výstupů je však porovnávat mezi sebou relevantní složky podle různých definic. Složitější komponenty výkonu v jedné teorii mají málokdy srovnatelný ekvivalent v ostatních



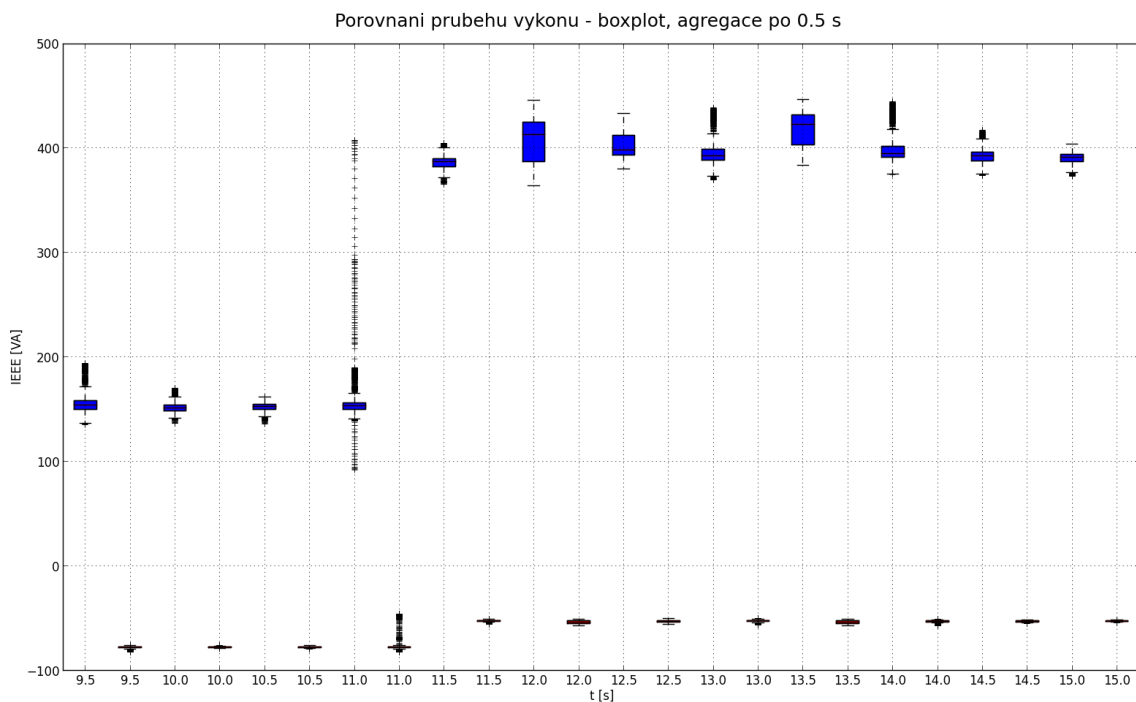
Obrázek 8: Spuštění několika PC v učebně A-TK3 - ukázka výstupu modulu `graphs_3f_SWA.py`

definicích.

Porovnat IRP a SWA zobrazení je možné pomocí modulu `graphs_1f_IRP-SWA.py`. Zobrazuje do jednoho okna zvolené složky z CPC a IEEE, a do dalšího okna p-q teorii. Obrázek viz 17.

Poněkud netradiční způsob analýzy dat je boxplotové zobrazení. Boxplot je graf zachycující několik významných statistických veličin na souboru dat. Zobrazuje minimum, maximum, horní a dolní kvartil a medián, a rovněž mimolehlá pozorování. Byl naimplementován skript `graphs_boxplot.py`, který vypočítané průběhy výkonů rozdělí do intervalů volitelné délky, a pro každý interval zobrazí boxplot jednak činného, jednak jalového výkonu. Ukázka je na obr. 9.

Další důležitý grafický výstup je spektrogram. Pro vytvoření spektrogramu nebyla použita funkce z knihovny `Matplotlib.Pyplot`, neboť neumožňovala výpočet FFT z jedné periody dat takovým způsobem, jak je zmíněno výše v této kapitole. Implementovaný spektrogram je také odlišný tím, že namísto zobrazení logaritmovaných výsledných hodnot, jak je to běžné, zobrazuje hodnoty normované k mezím



Obrázek 9: Boxplotové zobrazení

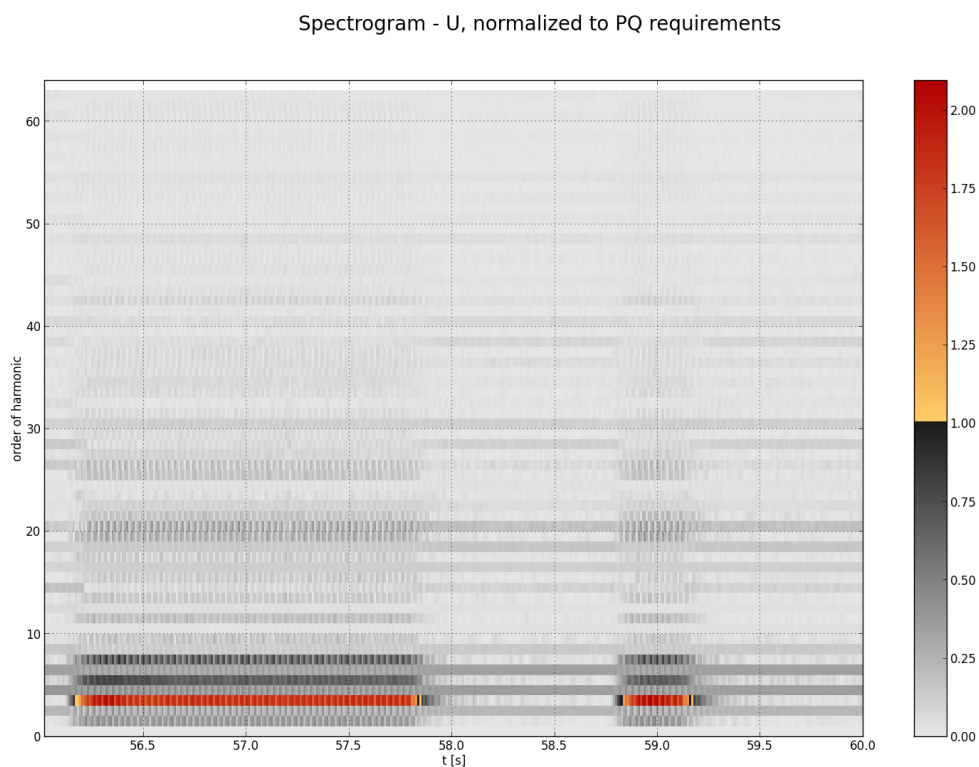
definovaným pro napětí kvalitou elektrické energie v normě ČSN EN 50160 [5]. Pokud dané harmonické splňují tyto limity, jsou zobrazeny ve stupních šedi; pokud jsou limity dané normou překročeny, je dané místo zbarvené žlutě až červeně. Takovýto spektrogram je na obr. 10. Je patrné, že byl opakovaně překročen limit pro 4. harmonickou složku.

Alternativně k tomuto grafickému výstupu byl vytvořena i verze spektrogramu, umožňující zadat větší počet period jako vstupní data pro FFT, a tedy zobrazit i meziharmonické složky. Moduly jsou nazvány `spectrogram.py` a `spectrogram2.py`.

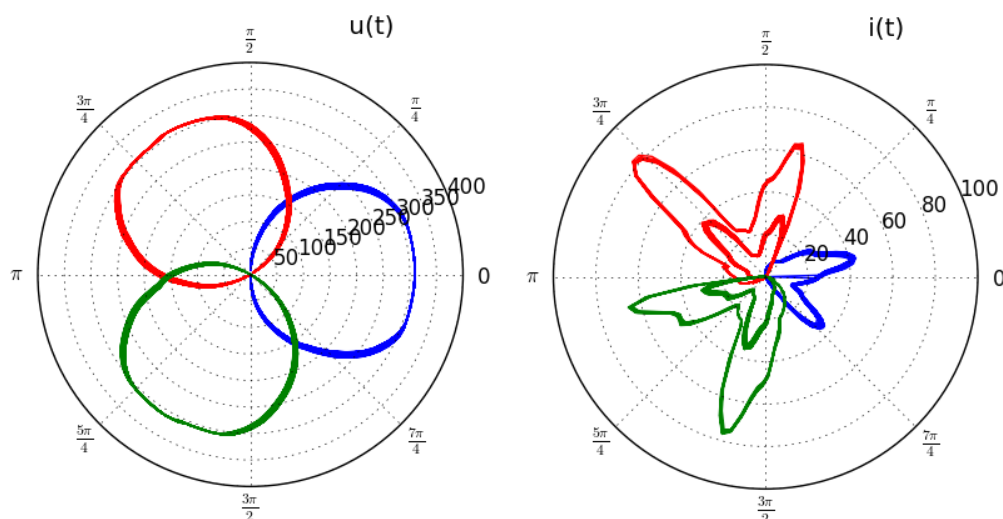
Nástroj, který se ukázal jako nezbytný k analýze IRP teoriemi, je tzv. polární zobrazení (moduly `polar_1f_IRP.py` a `polar_3f_IRP.py`). IRP teorie vedou na výrazně kmitavé signály, které se v běžném zobrazení obtížně interpretují. V polárním grafu jsou data zobrazena do roviny tak, že původní časová souřadnice je promítnuta jako postupně rostoucí úhel ϑ a závislá hodnota je interpretována jako radiální vzdálenost od počátku. Grafy jsou vytvořené tak, že jeden plný úhel ($2\pi \text{ rad}$) odpovídá jedné fundamentální periodě. Záporné hodnoty $x(t)$ se promítanou na převrácenou stranu grafu, proto se např. jedna perioda kosinového signálu

Tabulka 3: Mezní hodnoty jednotlivých harmonických složek v poměru vůči první harmonické podle ČSN EN 50160

liché		liché - nulová sekvence		sudé	
řád	limit [%]	řád	limit [%]	řád	limit [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.5	6-24	0.5
13	3	21	0.5		
17	2				
19-25	1.5				



Obrázek 10: Spektrogram normovaný k limitům, definovaným normou ČSN EN 50160



Obrázek 11: Ukázka polárního zobrazení 3-f napětí a proudu

zobrazí jako dvě překrývající se kružnice (viz obr. 11). Posunutí fáze se projeví jako pootočení celého grafu o daný úhel. Polární grafy ztrácejí časovou informaci, proto byly naimplementovány tak, že grafy výkonů mění barvu v navoleném časovém rozsahu. U třífázových dat jsou barevně odlišeny jednotlivé fáze zobrazeného napětí a proudu.

3.5 Nástroje určené k analýze výkonů

Jak již bylo zmíněno výše, výpočet složek výkonů u každé teorie je řešen jako funkce, která typicky přijímá jako argument navzorkované napětí, proud, vzorkovací frekvenci a základní síťový kmitočet (výjimku tvoří definice IEEE pro tři fáze - zde je ještě předáván proud středovým vodičem). Všechny výpočty jsou implementovány tak, aby bylo možné provádět výpočty pro různou fundamentální frekvenci (např. v USA je používán síťový kmitočet $f = 60Hz$). Výkony jsou zpět předávány v poli hodnot; k jejich správné interpretaci je třeba vědět, na které pozici se vyskytuje která veličina - jejich seznam je v tabulce 4. V tomto pořadí jsou hodnoty výkonů rovněž ukládány do CSV souborů. Většina implementací je vcelku přímočará, proto se v následujících kapitolách zmíním jen o implementacích, ke kterým je třeba něco dodat.

Tabulka 4: Pole předávaná výpočetními moduly

Teorie	fáze	druhy výkonů									
		P	P1	PH	N	Q1	S1	DI	DV	SH	S
IEEE	1f	P	P1	PH	N	Q1	S1	DI	DV	SH	S
IEEE	3f	P3	Q	Se	SA	SV	SX	Se1	DeI	DeU	SeH
CPC	1f	PD	Q	Ds	SC	S					
pq	1f	p	q	s							
pq	3f	p0	p	q	s						
pqr	3f	p	q	r	s						
GIRP	3f	p	q	r							

3.5.1 SWA analýza, IRP analýza

Z principu musí být u klasických definic výpočet organizován odlišným způsobem než u IRP teorií. U teorií okamžitého výkonu je výpočet relativně jednoduchý - výpočty jsou prováděny v jednoduchém cyklu vzorek po vzorku, výsledkem je průběh výkonů se stejným počtem vzorků jako vstupní data.

U IEEE definic a CPC teorie je postup prováděn na principu klouzavého okénka (sliding window analysis - SWA). Obdélníkové okénko má délku přesně 1 periodu a je z něj vždy určena jedna hodnota pro každou složku výkonu. Po provedení výpočtu je okénko posunuto o jeden vzorek a výpočty se opakují. Takto získaný soubor dat nelze interpretovat jako funkci času, ale jako množinu hodnot, agregovaných právě po jedné periodě. Výstupní data jsou tak o jednu periodu kratší než vstupní signál; výpočet je rovněž o poznání náročnější na hardware.

3.5.2 CPC teorie

Protože CPC teorie vyžaduje pro své definice znalost zátěže (komplexní admitance), je třeba tuto dopočítat z naměřených hodnot napětí a proudu. Na jednu periodu těchto veličin je aplikována FFT a ze získaných fázorů jednotlivých harmonických složek je dopočítána komplexní admitance (obecně proměnná s frekvencí):

$$\hat{Y}_n = G_n + jB_n = \frac{\hat{I}_n}{\hat{U}_n} \quad \forall n \in N. \quad (3.5.1)$$

Toto je však možné pouze u jednofázových systémů a u třífázových systémů se zapojením do hvězdy. U zapojení do trojúhelníku je nemožné dopočítat hodnotu zátěží z průběhu napětí a proudu. Jelikož se literatura nikde nezmiňuje o definicích CPC pro zapojení do hvězdy a všude jsou třífázové systémy řešené pouze s trojúhelníkovou konfigurací, nelze CPC v tomto případě vůbec aplikovat na třífázové systémy. Jde o jeden z nejzávažnějších nedostatků této teorie.

Při praktickém výpočtu výkonů podle CPC není třeba vypočítávat přímo průběhy jednotlivých složek proudu a z nich posléze určovat efektivní hodnoty. Pro efektivní hodnoty lze odvodit samostatné vztahy, které výpočet značně urychlují:

$$\|i_a\| = G_{eD} \sqrt{\sum_{n \in D} \|u_n\|^2} \quad (3.5.2)$$

$$\|i_r\| = \sqrt{\sum_{n \in D} B_n^2 \|u_n\|^2} \quad (3.5.3)$$

$$\|i_s\| = \sqrt{\sum_{n \in D} (G_{en} - G_{eD})^2 \|u_n\|^2} \quad (3.5.4)$$

$$\|i_C\| = \sqrt{\sum_{n \in C} \|i_n\|^2} \quad (3.5.5)$$

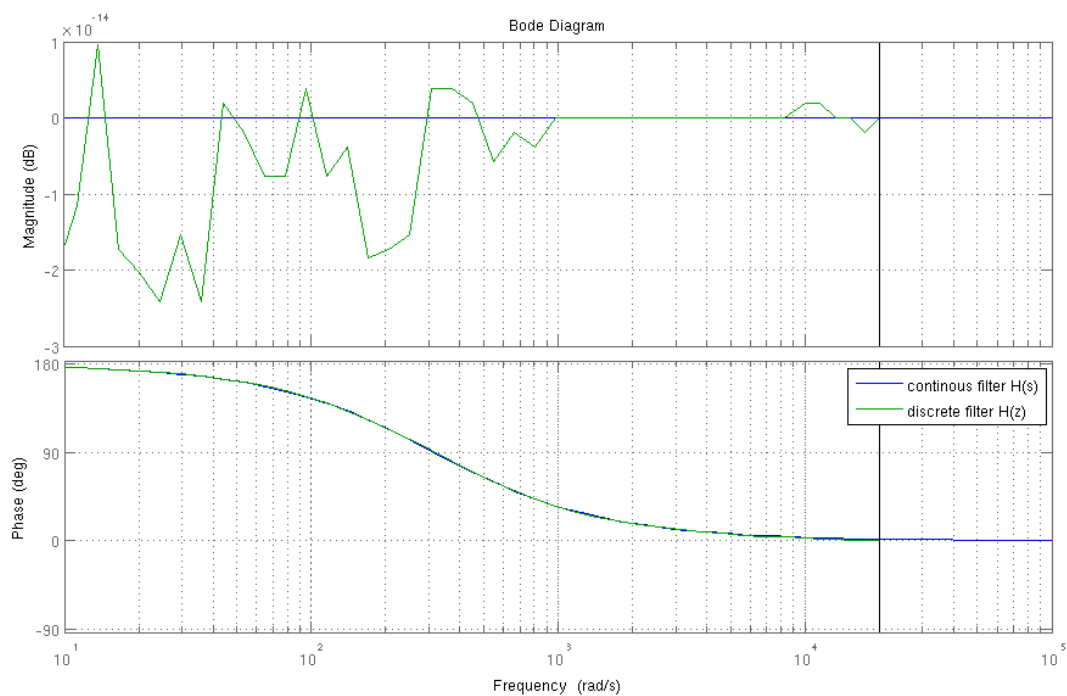
3.5.3 p-q teorie pro jednofázové systémy

Při výpočtu p-q teorie pro jednu fázi bylo třeba diskretizovat a naimplementovat zmínovaný all-pass filtr (viz přenosová funkce 2.4.6). K tomuto účelu byla použita Tustinova aproximace (tj. $s = \frac{2}{T_V} \frac{z-t}{z+t}$). Výsledný číslicový filtr má v z-transformaci přenos:

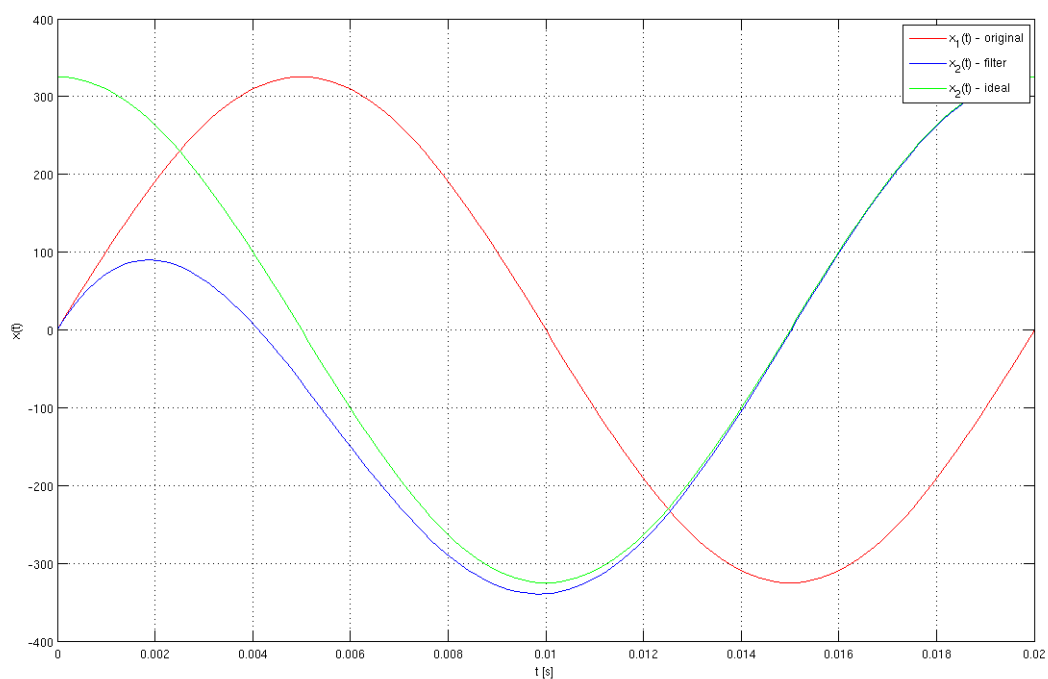
$$H(z) = -\frac{k_1 + k_2 z}{k_2 + k_1 z}, \quad (3.5.6)$$

kde $k_1 = T_V - 2T_1$, $k_2 = T_V + 2T_1$ (T_V je vzorkovací perioda). Tyto konstanty jsou určovány přímo při výpočtu, aby byla zachována možnost filtrace pro různé síťové a vzorkovací frekvence.

Pro představu, jak filtr určený k posunutí fáze funguje, jsou přiloženy obr. 12 (Bodeho diagram - srovnání spojitého a diskretizovaného filtru; magnitudová charakteristika diskretizovaného filtru nabývá hodnot řádově 10^{-14} , což je prakticky nula) a obr. 13 (posunutí fáze u sinusového průběhu o kmitočtu $f = 50 \text{ Hz}$; červeně



Obrázek 12: Srovnání frekvenční charakteristiky spojitého a diskrétního filtru



Obrázek 13: Ukázka funkce filtru na harmonickém signálu $f = 50$ Hz

původní signál, modře filtrovaný signál, zeleně ideální výstupní signál s otočenou fází). Je patrné, že trvá zhruba půl periody, než odezní přechodový děj a filtr začne fungovat, jak má. Tento fakt má jistý vliv na analýzu pomocí 1-fázové p-q teorie.

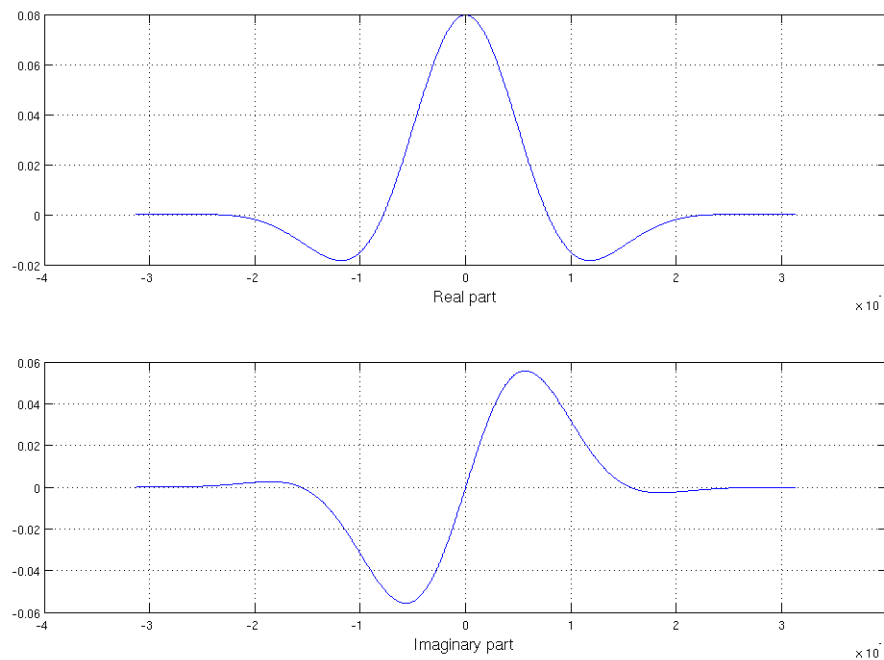
3.5.4 DWT definice

Implementace postupu popsaného v kap. 2.5 vyžaduje použití komplexní waveletové transformace. Z knihoven, které toto umí, není žádná veřejně dostupná pro jazyk Python. Výpočet byl proto implementován v prostředí Matlab. K analýze byly použity nástroje z doplňku Wavelet Toolbox.

Autoři [11] navrhují použít k transformaci buď komplexní Gaussův wavelet anebo komplexní Morletův wavelet. Z těchto dvou byl vybrán Morlet, neboť umožňuje snadno nastavit centrální frekvenci waveletu. Vlastnosti waveletu se v Matlabu definují řetězcem ve formátu `cmorFb-Fc`, kde `Fb` značí frekvenční pásmo (v tomto případě bylo podle [11] voleno $Fb = 50 \text{ Hz}$) a `Fc` je střední frekvence waveletu. Komplexní Morletův wavelet je definován vztahem:

$$\psi_{cmor}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi F_b}} e^{2\pi F_c i x} e^{-x^2/F_b}. \quad (3.5.7)$$

Reálná a imaginární část komplexního Morletova waveletu je zobrazena na obr. 14. Pro tento druh waveletu neumožňuje Matlab provést DWT, ale pouze výpočetně poněkud náročnější CWT. Výsledné spektrum je tak podrobnější, záměna CWT za DWT z hlediska analýzy výkonů nepřináší žádnou překážku.



Obrázek 14: Komplexní Morletův wavelet `cmor50-0.05`

Tabulka 5: Škály a odpovídající pseudofrekvence pro wavelet `cmor50-0.05` a vzorkovací frekvenci $F_s = 6\,400$ Hz

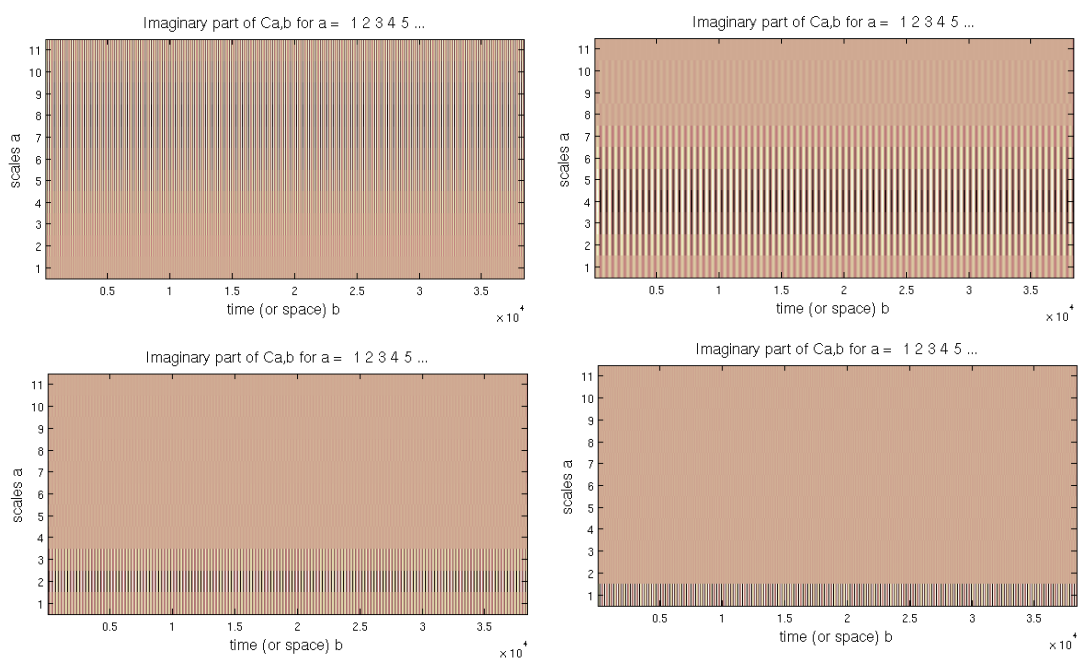
škála	1	2	3	4	5	6
pseudofrekvence [Hz]	400	200	133,33	100	80	66,67
škála	7	8	9	10	11	12
pseudofrekvence [Hz]	57,142 9	50	44,44	40	36,36	33,33

Dále byla použita funkce `wmaxlev()`, která určí, na kolik škál lze signál rozložit (počet těchto škál závisí na použitém waveletu a na délce analyzovaného signálu), a funkce `scal2frq()`, která pro danou škálu určí příslušnou pseudofrekvenci podle vztahu 2.1.6. Pomocí této funkce byla určena vhodná střední frekvence waveletu na $F_c = 0.05$ Hz. Taková hodnota zajistí, že jedna ze škál odpovídá fundamentální síťové frekvenci $f = 50$ Hz. Škály od 1 do 12 a jejich odpovídající pseudofrekvence jsou uvedeny v tab. 5. Je patrné, že tyto škály pokrývají první, druhou, čtvrtou a osmou harmonickou, některé mezharmionické a také subharmonické složky. Čím je signál delší, tím více je možné wavelet dilatovat (větší škála) a tím pokrýt nižší kmitočty.

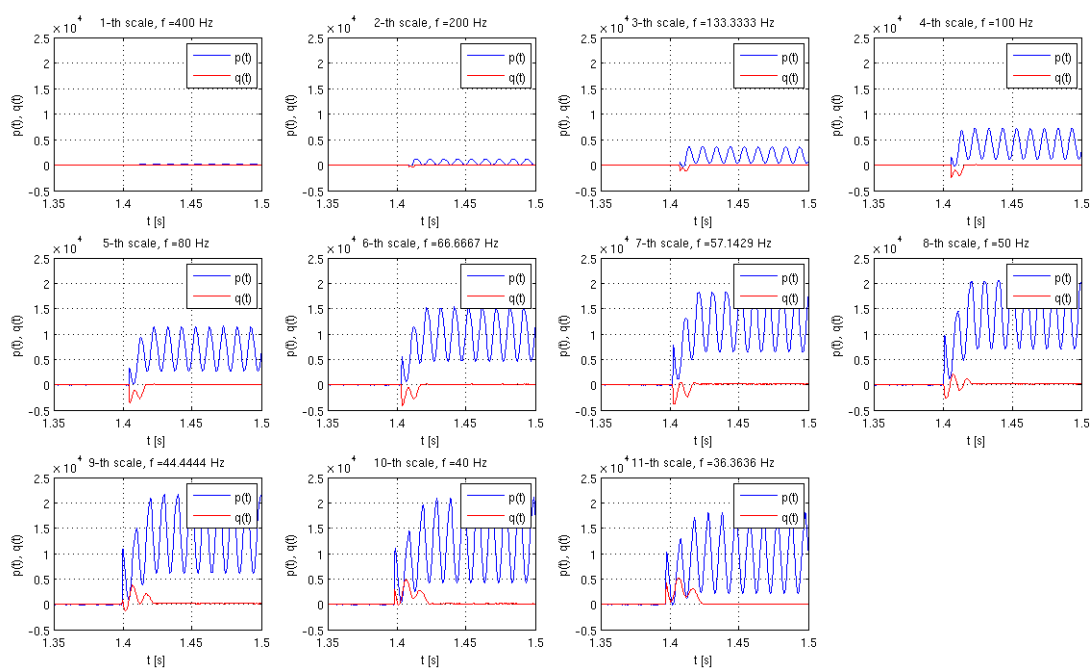
Zkušebně byla provedena transformace signálu o různých kmitočtech. Na obr. 15 jsou zobrazeny analýzy harmonického signálu o frekvencích 50, 100, 200 a 400 Hz. U prvních dvou je na první pohled zřejmé rozmazání spektra. Signál 50 Hz by se správně měl promítnout podle tabulky 5 pouze do škály 8, je však znatelný ve škálách ~4-11. (Bylo vybráno zobrazení imaginární části spektra, která sama o sobě nemá žádné fyzikální opodstatnění, avšak je zde výsledek výraznější, než na zobrazení ve formátu magnitudy a argumentu.) Rozmazání spektra představuje z hlediska další analýzy jistou překážku. U vyšších frekvencí už rozmazání není tak zřejmé.

Dále byly naimplementovány vzorce 2.5.4. Ze získaného spektra je důležitá škála, odpovídající podle tab. 5 základní síťové frekvenci 50 Hz. Jedná se v tomto případě o škálu 8; z toho vyplývá, že analyzovaný signál musí být dlouhý alespoň 32 period (ověřeno experimentálně).

Ukázka grafického výstupu analýzy touto metodou je na obr. 16 (spuštění reálné



Obrázek 15: Waveletová transformace harmonického signálu o frekvencích 50, 100, 200 a 400 Hz.



Obrázek 16: Spuštění rychlovarné konvice - výkony na jednotlivých škálách CWT

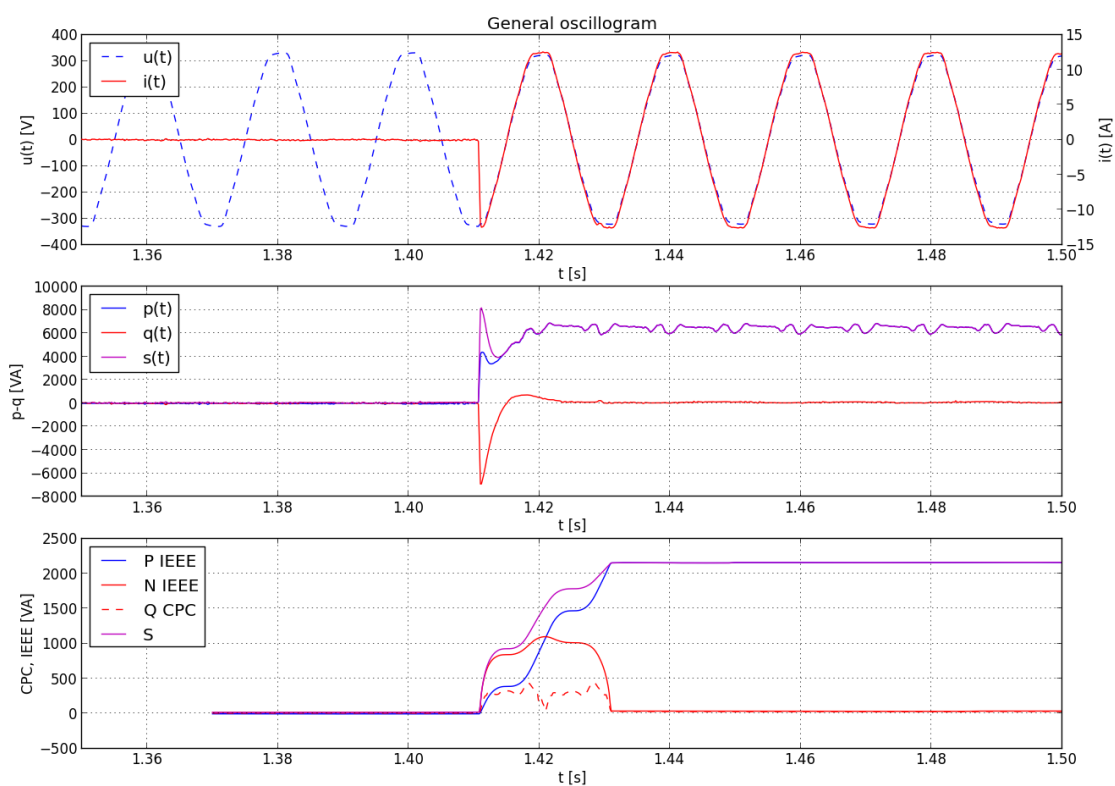
zátěže, další analýza těchto dat pro srovnání viz obr. 17, kap. 4.1). Je patrný jistý přechodový jev, který trvá cca jednu fundamentální periodu. Z tohoto hlediska je dosažený výsledek horší než u 1-fázové p-q teorie, kde přechodový jev trval cca jednu polovinu periody. Výsledný průběh okamžitého výkonu je kmitavý, přestože zátěž je čistě reálná. Z obr. 16 je dále patrné značné rozmazání spektra - výkony na kmitočtu $f = 50 \text{ Hz}$ jsou rozloženy do mnoha sousedících škál.

4 Praktická aplikace analytických nástrojů

4.1 Analýza reálně naměřených hodnot

Analýza může být ve své podstatě dvojího typu; zprvu je třeba analyzovat spotřebu jednotlivých spotřebičů a získat tak přehled o tom, jak se který samostatný spotřebič v síti chová. Z analýzy jednotlivých spotřebičů je možné vyčíst jednak charakter daného spotřebiče, jednak určité aspekty různých použitých teorií. Dále je možné provádět analýzu měření z velkých okruhů, kde je spotřebičů zapojeno více, a usuzovat, co se kdy v síti stalo.

Data, která byla v rámci této práce analyzována, zahrnují široké spektrum různých reálných měření. Jednak byl měřen odběr několika typických kancelářských spotřebičů, jako např. rychlovarná konvice, ventilátor, počítačový monitor apod. Na těchto datech je zajímavé sledovat, jak se který elektrospotřebič chová v různých režimech činnosti.

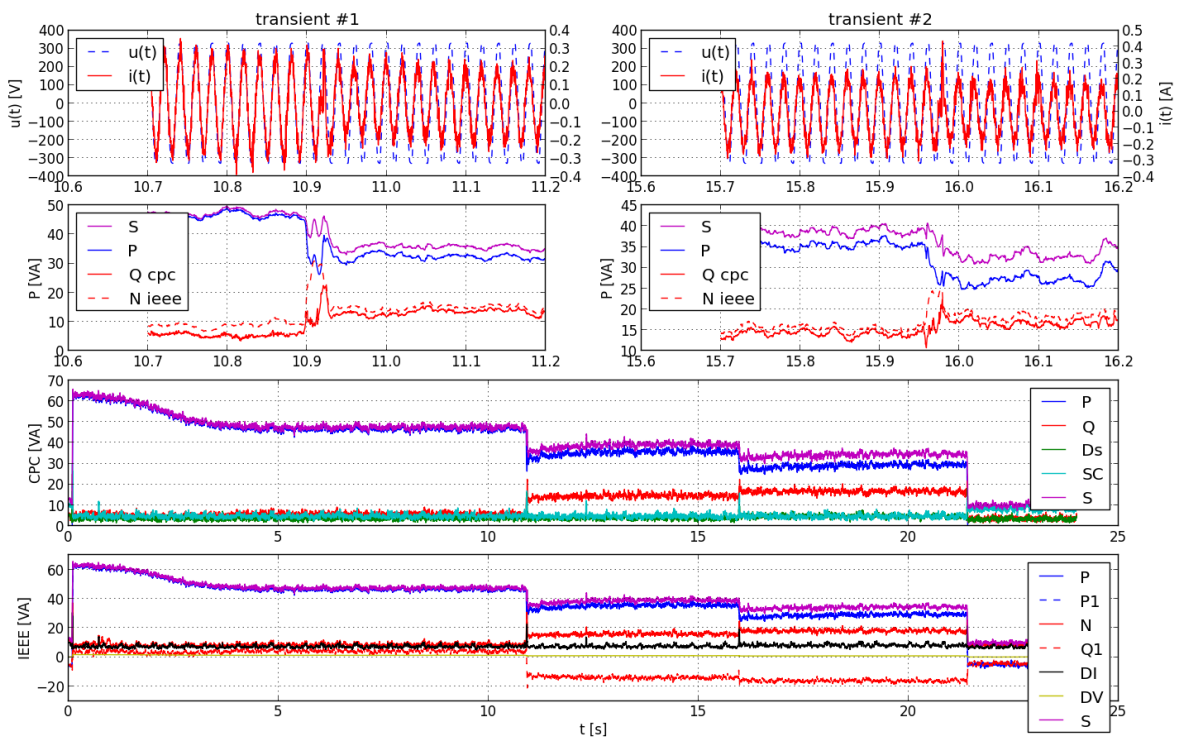


Obrázek 17: Spuštění reálné zátěže - uprostřed p-q teorie, dole CPC a IEEE

Zdánlivě nezajímavým, ve skutečnosti však účelně demonstrativním příkladem,

je spuštění čisté reálné zátěže, v tomto případě rychlovarné konvice. Na obr. 17 je zobrazen výsledek analýzy 1-fázovou p-q teorií (uprostřed) a dále některé veličiny z CPC a IEEE. Je patrné, jak tyto definice reagují na přechodový děj kratší než 1 perioda. U CPC a IEEE tato odchylka vyplývá z principu analýzy pomocí FFT s klouzavým okénkem. U p-q je průběh důsledkem probíhajícího přechodového jevu na filtru $H(z)$.

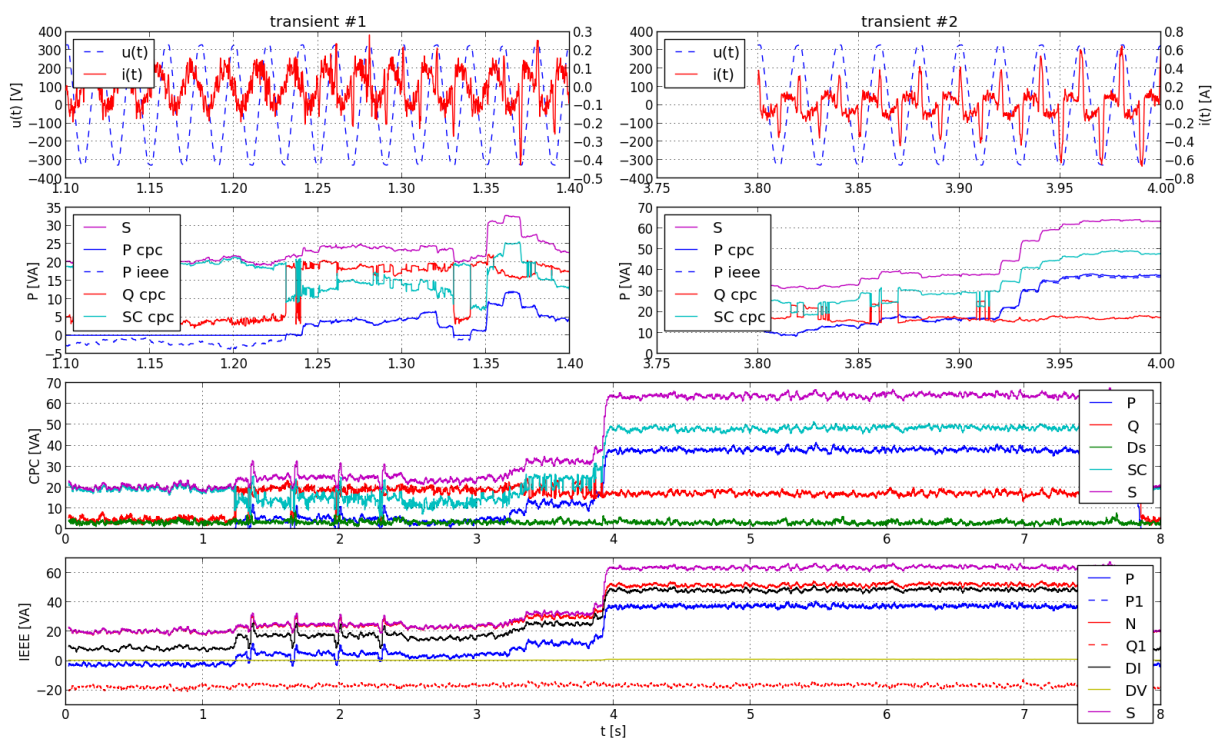
Dalším analyzovaným spotřebičem je kancelářský ventilátor², viz obr. 18. Měření probíhalo při různých otáčkách. Je zřejmé, že nejlépe je ventilátor kompenzovaný při maximální rychlosti - činný výkon nabývá prakticky stejných hodnot jako zdánlivý; není přítomné ani žádné zkreslení. Účinník bude v tomto případě blízký jedné. Při menším výkonu již začíná být překompenzovaný (začíná mít kapacitní charakter, což je zřejmé ze záporné hodnoty fundamentálního jalového výkonu v IEEE, nikoliv však - z výše zmíněných důvodů - u jalového výkonu CPC). Nárůst výkonu ihned po sepnutí oproti ustálenému stavu je důsledkem překonávání momentu setrvačnosti lopatek; obdobný jev (s opačným následkem) nastává při snižování rychlosti.



Obrázek 18: Běh kancelářského ventilátoru na různých rychlostech

²Rozbor tohoto (a rovněž následujícího) měření je součástí publikací [A,B].

Na obr. 19 je zachyceno spuštění PC monitoru. Na grafu je patrné, jak se monitor chová ve stand-by režimu (před zapnutím - čas 0 - 1 s), jak při náběhu a jak v normálním provozu. Ve stand-by režimu má nenulovou spotřebu, z obou teorií je však patrné, že činný výkon žádný odebíraný není. CPC teorie zde vykazuje téměř 100% generovanou složku; to lze interpretovat jako přetváření odebíraného zdánlivého výkonu na harmonické zkreslení. První přechodový děj, získaný měřením, je zapnutí

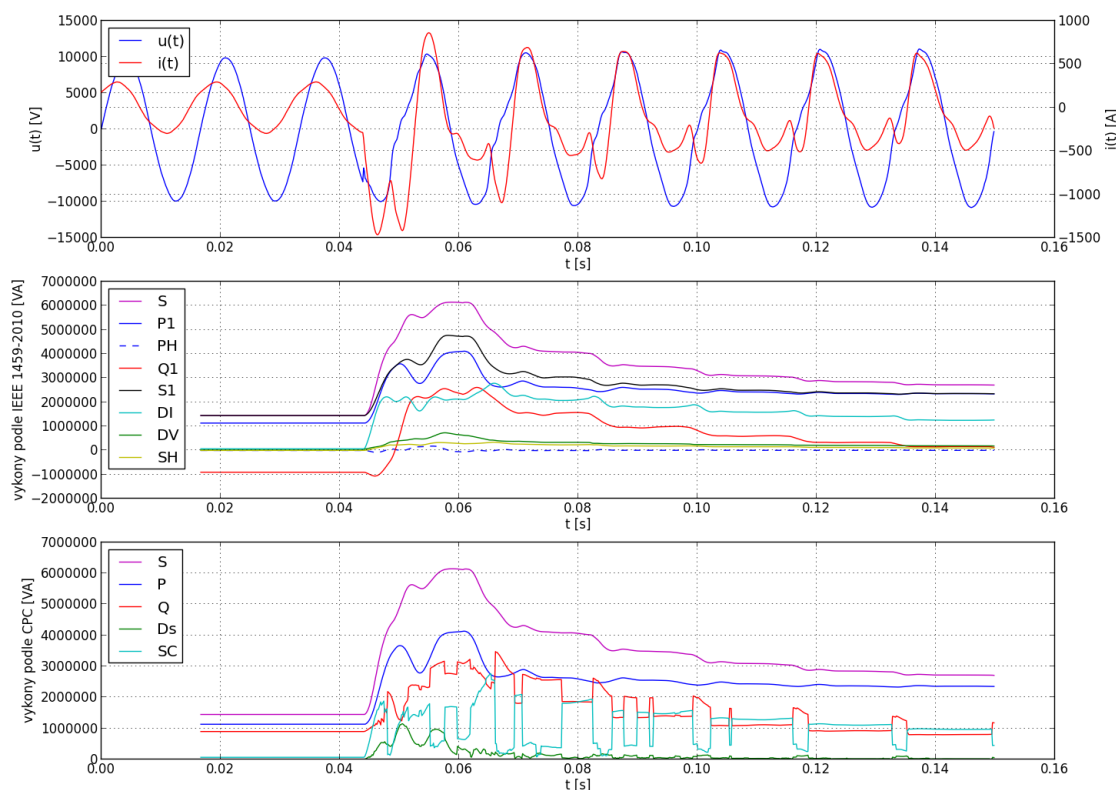


Obrázek 19: Zapnutí / vypnutí monitoru - 1-f analýza CPC a IEEE

spotřebiče. Je zobrazený v levém výřezu obr. 19. Začíná narůstat činný výkon, díky čemuž začnou narůstat i jiné složky CPC teorie (na úkor generovaného výkonu). Znatelné fluktuace výkonu jsou součástí warm-up fáze. Druhý přechodový děj - plné spuštění - je v pravém výřezu. Narůstá zde činný výkon. CPC indikuje rovněž vzestup generovaného výkonu; v IEEE narůstá hlavně deformační výkon proudu (a díky tomu také neaktivní výkon). Oboje poukazuje na vysokou úroveň harmonické deformace proudu (což je ostatně vizuálně patrné také z oscilogramu). U IEEE je fundamentální jalový výkon záporný; na první harmonické se tedy zátěž chová jako kapacita. Tento fakt není z CPC vůbec zřetelný. Z blízkosti výkonů S a N u IEEE lze usuzovat na nízkou hodnotu účinníku tohoto spotřebiče.

Analýze byla podrobena měření, získána z [10]. Tato databáze obsahuje záznamy

událostí spojených s kvalitou elektrické energie - výpadky napětí, mezifázové zkraty apod. Tato data mají základní síťový kmitočet $f = 60 \text{ Hz}$. Z některých těchto měření je znatelný charakteristický rys CPC teorie (např. obr. 20). Jedná se o oscilace

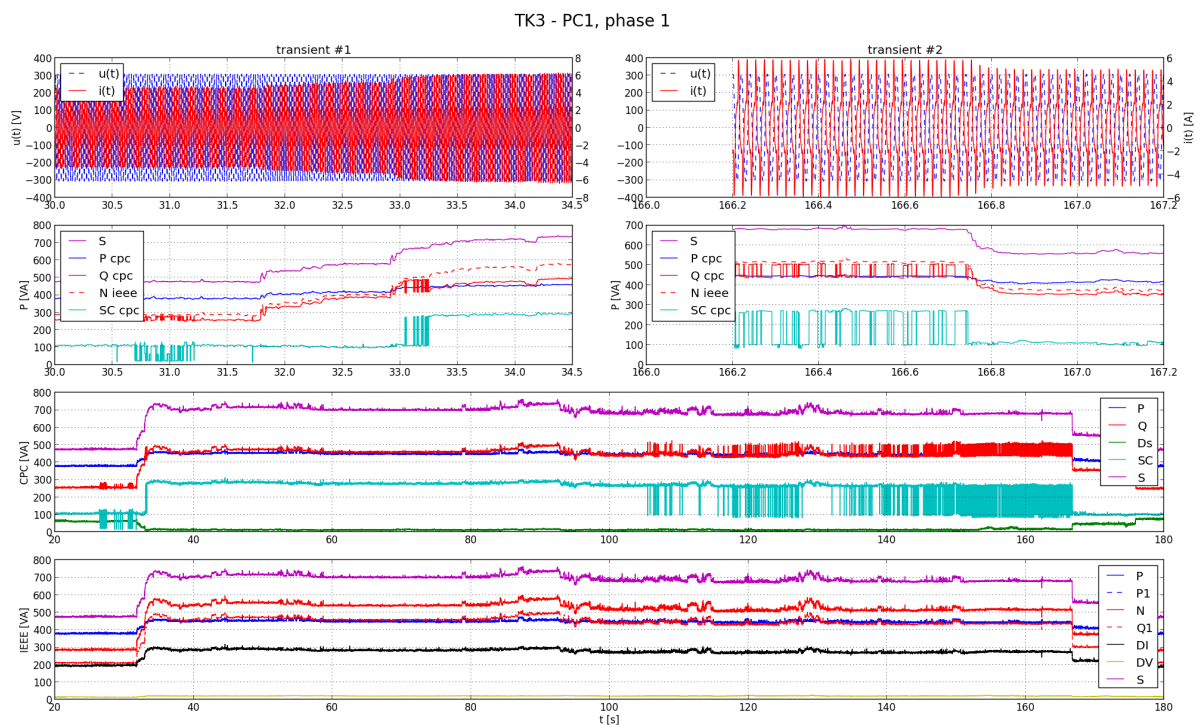


Obrázek 20: PQ událost, data z [10].

hodnot mezi generovaným výkonem a ostatními složkami. Toto nastává, když se fáze jedné (či více) z harmonických, která nese významnější podíl výkonu, pohybuje okolo hodnoty $\frac{\pi}{2} \text{ rad}$. Pokud tuto hodnotu překročí, je celá přerazena do generovaného výkonu a její podíl chybí např. v jalové složce, nebo roztroušené deformační složce. Po několika vzorcích se většinou vrátí zpět - v takovém případě lze usoudit, že oscilace způsobená posunutím fáze přes hodnotu $\frac{\pi}{2} \text{ rad}$ vznikla jako matematický důsledek aplikace FFT a okénkovacího principu. Na obr. 20 je patrné, že v IEEE definicích k žádnému takovému jevu nedochází.

Některá reálná měření pocházejí z plynárny u univerzitní budovy L. Zde dochází opakovaně ke krátkodobému výpadku napájení na jedné fázi; během tohoto výpadku dochází ke značnému harmonickému znečištění zbylých fází - to je patrné na ukázkovém spektrogramu na obr. 10.

Další data byla získána z několika lokalit zajímavých z hlediska sledování kvality elektrické energie. Mimo jiné byla naměřena data získána sepnutím většího množství osobních počítačů. Ukázka vyhodnocení takového měření je na obr. 21. Na přechodovém jevu č. 1 jsou patrné dvě vlny spouštění PC ($t_1 = 31,8 \text{ s}$, $t_2 = 32,9 \text{ s}$). Je patrné, jak se při přidání dalších PC úhel některé z významnějších harmonických posunul nad hodnotu $\frac{\pi}{2} \text{ rad}$, a tak došlo k navýšení složky S_C v CPC teorii. Proud je poměrně hodně zkreslený a účinník se se zapnutím PC znatelně zhoršil oproti spotřebičům, které běžely na pozadí.



Obrázek 21: Spuštění několika PC v učebně A-TK3 - srovnání CPC a IEEE, detaily zapnutí a vypnutí

4.2 Optimalizace náročných výpočtů

Některá rozsáhlá měření byla zpracovávána na univerzitním výpočetním clusteru Hydra. Vzhledem k tomu, že výpočty nejsou programovány paralelně, nebyl využit naplno potenciál clusteru, je zde však možné spustit více výpočtů najednou.

Jisté efektivitu výpočtů bylo dosaženo obezřetnějším nakládáním s voláním FFT

u SWA výpočtů. V každé iteraci je spočítáno FFT pouze jednou a tyto data jsou následně použita pro výpočet jak IEEE definic, tak CPC. Další z možností, jak by bylo možné tyto výpočty zefektivnit je paralelizace; převážně se totiž jedná o vcelku snadno paralelizovatelné algoritmy.

Dalšího zrychlení by bylo možné dosáhnout použitím RFT (Real-Time Sliding DFT) namísto klasického Cooley-Tukey algoritmu, běžně používaného k výpočtu FFT. Tento algoritmus umožňuje zrychlení FFT, pokud se výpočet opakuje nad daty, kde byl změněn pouhý jeden vzorek (typicky posunutí okénka). RFT algoritmus je prezentován v [4].

Příležitost k zefektivnění práce je také ve způsobu ukládání a načítání dat. Binární zápis vypočítaných výkonů by oproti CSV formátu mohl ušetřit mnoho místa. Při provádění analýzy není bráno v potaz časové umístění měření (čas začíná vždy bodem $t = 0$ s), proto tato informace chybí ve vytvořených CSV souborech. Při vytváření grafického výstupu jsou vždy načtena data z celého měření, přestože na vytvoření grafu stačí často několikasekundový úsek křivek.

5 Závěr

Zadáním práce bylo seznámit se s běžnými i netradičními postupy při definování různých aspektů elektrického výkonu. Byla vypracována rešerše shrnující všechny významné výkonové teorie. Jedná se především o standardní definice normy IEEE 1459-2010, dále o tzv. CPC teorii a dále několik postupů, které umožňují definovat okamžitý činný a jalový výkon (tzv. IRP teorie). V práci je zmiňován rovněž koncept okamžitých výkonů, využívající komplexní waveletovou transformaci.

Jádrem práce bylo pak praktické naimplementování těchto definic tak, aby bylo možné je aplikovat na reálně naměřená data. Praktickým výsledkem je tedy soubor samostatných skriptů psaných v interpretovaném programovacím jazyce Python (v2.7). Tyto skripty kromě vykonání samotných výpočtů rovněž představují jisté rozhraní pro nakládání s daty, jednak surovými oscilogramy, jednak s již vypočítanými průběhy výkonů. Část těchto modulů také obstarává grafický výstup výpočtů.

V další části práce byly tyto implementace testovány a aplikovány na reálných datech. Tato data pokrývají především měření různých přechodových jevů, vzniklých spouštěním spotřebiče, jednak ustálených stavů. Byla provedena měření jak samostatně běžících spotřebičů, tak na větších síťových obvodech, kde je kromě analyzovaného spotřebiče jisté šumové pozadí. Na takto získaných datech byla provedena analýza. Výsledky analýzy mají vypovídací hodnotu nejen o spotřebiči samotném, ale také o funkci jednotlivých teorií.

Základní definice, zmiňované v normě IEEE (činný, jalový, zdánlivý výkon), jsou dostatečně intuitivní a mohou napovědět mnoho o funkci spotřebiče. Nejsou však příliš vhodné k analýze krátkých a rychlých přechodových jevů; užití FT zde předpokládá ustálený stav. Některé zde předkládané veličiny jsou vhodné k analýze např. točivých strojů (typicky sousledné, zpětné a nulové složky, získané Fortescueovou dekompozicí; výkony vyšších harmonických), u jiných spotřebičů mohou svého významu pozbyť. Jiné veličiny jsou spíše výsledkem matematické důslednosti a je obtížné nalézt jejich skutečný fyzikální význam (např. aritmetický a vektorový zdánlivý výkon).

CPC teorie nabízí snadno interpretovatelný náhled na funkci spotřebiče. Každá její složka odpovídá jednomu konkrétnímu typu zkreslení, které může být v systému přítomno. Její aplikace na třífázové systémy je bohužel problémová. Jelikož jsou výpočty závislé na dobré znalosti admitance analyzovaného spotřebiče, v naší aplikaci je vyloučena analýza trojúhelníkových konfigurací. Dostupná literatura ani sám autor této teorie její užití pro čtyřvodičové sítě neuvádí. Dalším negativním aspektem této teorie je nezápornost definovaných výkonů. Záporná hodnota výkonu má svůj význam jednak u činného výkonu - tento jev je v CPC teorii pokryt definicí tzv. generovaného výkonu, jednak u jalového výkonu - tento relativně podstatný aspekt není v CPC teorii nijak detekovatelný. Podobně jako IEEE definice i CPC používá FT, a proto není vhodná k analýze rychlých přechodových jevů.

Naimplementované IRP teorie (p-q, p-q-r, a zobecněná IRP teorie) nejsou příliš vhodné ke klasické grafické analýze. Jejich výstupem je totiž relativně obtížně interpretovatelný, často periodicky kmitavý průběh zdánlivého, činného a jalového výkonu. Byly proto naimplementovány zvláštní moduly, umožňující zobrazení těchto výkonů v polárních grafech. Tyto definice původně vznikly z potřeby řídit kompenzátory účiníku a jalového výkonu v (pseudo-)reálném čase. V naší aplikaci tedy pravděpodobně najdou jiné využití než off-line grafickou analýzu. Ze svého principu však narozdíl od IEEE a CPC umožňují matematicky přesnou analýzu rychlých přechodových jevů.

Jako spíše experimentální byla pojata implementace výpočtů využívajících WT. Tyto definice nabízejí široké možnosti analýzy, je to však poměrně nová záležitost a orientovat se v možnostech, výhodách a nevýhodách, které WT (a také komplexní WT) nabízí, není triviální.

Diplomová práce předpokládá další rozšíření a využití k disertaci. Zde vypracované implementace najdou své uplatnění v analytických přístrojích firmy KMB systems s.r.o. Dílčí výsledky práce byly publikovány na konferenci EPE (ČVUT, Praha 2012) a CIRED (IET, Stockholm, 2013) (viz sekce Vlastní publikace).

Literatura

- [1] Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.: *Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits*, International Power Electronics Conference, Japonsko, 1983
- [2] Akagi H., Kim H.: *The Instantaneous Power Theory on the Rotating p - q - r Reference Frame*, IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Hong Kong, 1999
- [3] Afonso J. L., Freitas M. J. S., Martins J. S.: *p - q Theory Power Components Calculations*, University of Minho, Portugalsko, 2003
- [4] Baumann C.: *RFT: A Simplified Fast Real-Time Sliding DFT Algorithm*, Convict Episcopal de Luxembourg Boarding School, Lucembursko, 2005
- [5] Broshi A.: *Monitoring Power Quality Beyond EN 50160 and IEC 61000-4-30*, Johannesburg, 2007
- [6] Budeanu C.: *Puissances Reactives at Fictives*, Institut Romain de l'Energie, 1927
- [7] Clarke E., Duesterhoeft W. C., Schulz M. W.: *Determination of Instantaneous Currents and Voltages by Means of Alpha, Beta, and Zero Components*, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1951
- [8] Czarnecki L. S.: *Current's Physical Components (CPC) Concept: a Fundamental of Power Theory*, Lousiana State University, 2008
- [9] Czarnecki L. S.: *Budeanu and Fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents*, 1997
- [10] *DOE/EPRI National Database Repository of Power Quality Events* [online], 2012, <<http://expertmonitoring.com/doelibrary/>>
- [11] Driesen J. L. J., Belmans R. J. M.: *Wavelet-Based Power Quantification Approaches*, 2003

- [12] Fryze S.: *Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia*, Politechnika Lwowska, 1931
- [13] Fortescue C. L.: *Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks*, 1918
- [14] Kukačka L.: *Výkonové teorie: řešerše a implementace*, semestrální projekt, TUL, 2012
- [15] Haque M. T., Ise T.: *Implementation of Single-Phase p-q Theory*, Tabriz University, Írán, Osaka University, Japonsko, 2002
- [16] IEEE Power and Energy Society, *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*, 2010
- [17] Johansson M.: *The Hilbert Transform*, diplomová práce, Växjö University, Švédsko, nedatováno
- [18] *Matplotlib* [online], 2013 <<http://matplotlib.sourceforge.net/>>
- [19] *Mathworks Documentation Center - Wavelet Toolbox Documentation* [online], 2013 <<http://www.mathworks.com/help/wavelet/>>
- [20] Morsi W. G., El-Hawary M. E.: *A New Perspective for the IEEE Standard 1459-2000 via Stationary Wavelet Transform in the Presence of Nonstationary Power Quality Disturbance*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2008
- [21] Morsi W. G., El-Hawary M. E.: *A New Reactive, Distortion and Non-Active Power Measurement Method for Nonstationary Waveforms Using Wavelet Packet Transform*, Electric Power Systems Research, 2009
- [22] Morsi W. G., El-Hawary M. E.: *The Most Suitable Mother Wavelet for Steady-State Power System Distorted Waveforms*, Dalhousie University, Kanada, 2008
- [23] Morsi W. G., El-Hawary M. E.: *Reformulating Three-Phase Power Components Definitions in the IEEE Standard 1459-2010 Using Discrete Wavelet Transform*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2007

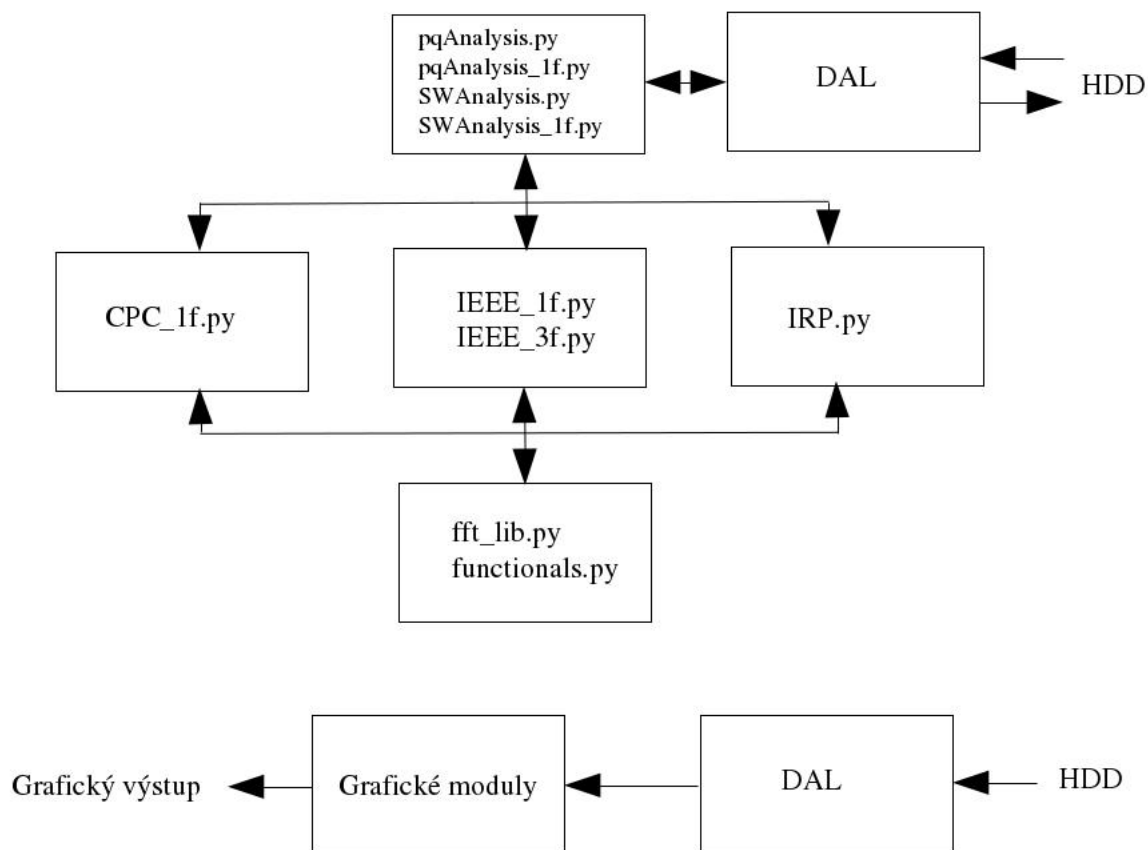
- [24] *Scientific Computing Tools for Python - NumPy* [online], 2013
<<http://www.numpy.org/>>
- [25] Peng F. Z., Lai J.-S.: *Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996
- [26] *Python v2.7.3 documentation* [online], 2013,
<<http://docs.python.org/license.html>>
- [27] Rektorys K. a kol.: *Přehled užité matematiky*, Praha, 1963
- [28] Švec M.: *Waveletové transformace*, Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Přírodovědecká fakulta, Ústí nad Labem, 2008
- [29] *Scientific Tools for Python* [online], 2013, <<http://scipy.org/SciPy>>
- [30] Žáček J.: *Výkony a účinník v deformované síti podle současných názvoslovných norem*, ČVUT v Praze, 2008

Vlastní publikace

- [A] Kukačka L., Kraus J., Bubla V., Štěpán P.: *CPC and IEEE Power Theory - Application for Offline Waveform Data Analysis*, 22nd International Conference on Electricity Distribution, CIRED Stockholm 2013
- [B] Kukačka L., Kraus J.: *CPC teorie - praktická analýza běžných jevů v síti*, Conference on Electric Engineering, České vysoké učení technické, Praha 2012
- [C] Kraus J., Štěpán P., Kukačka L.: *Optimal Data Compression Techniques for Smart Grid and Power Quality Trend Data*, IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP Hong Kong 2012
- [D] Kraus J., Štěpán P., Kukačka L.: *Optimální techniky komprese dat pro inteligentní sítě a kvalitu elektrické energie*, Electric Power Engineering, Technická univerzita v Brně, 2012
- [E] Kraus J., Bubla V., Kukačka L.: *Data Modeling for Reduction of Volume in Large Archives of Power Quality Data*, 21st International Conference on Electricity Distribution, CIRED Frankfurt 2011

Přílohy

A Struktura uspořádání analytických modulů



B Návod k použití analytických modulů

V této sekci je popsáno jak postupovat při použití analytických nástrojů vytvořených v této práci. Pro správnou funkci je třeba mít v operačním systému nainstalovaný Python v2.7, knihovnu NumPy v1.7.0 a knihovnu Matplotlib (vyvíjeno na verzi 1.2.1). Analytické moduly jsou z hlediska operačního systému spustitelné skripty. Při použití na platformě GNU/Linux je potřeba nastavit příznak `chmod u+x`.

Hlavní skripty, které řídí průběh analýzy, jsou umístěné ve složce Analysis. Jedná se o čtyři skripty, z nichž dva jsou určené pro analýzu IRP teoriemi a dva pro SW analýzu:

`pqAnalysis.py` - p-q teorie, p-q-r teorie a GIRP

`pqAnalysis_1f.py` - p-q teorie pro jednu fázi

`SWAnalysis.py` - IEEE

`SWAnalysis_1f.py` - IEEE, CPC

Na začátku těchto skriptů jsou definovány boolovské proměnné indikující teorie, podle kterých má být provedena analýza, tj. např.:

```
bPQ = 0;
```

```
bGIRP = 0;
```

```
bPQR = 1;
```

Nastavením příslušné proměnné na 0 se deaktivuje výpočet podle příslušné teorie (obdobně i u grafických skriptů).

Dále je třeba zajistit načtení oscilogramů pomocí vrstvy DAL. Po výběru vhodné funkce k importu dat je nutné sestavit řetězec obsahující název souboru a cestu k příslušné složce, a také informaci o délce souboru (většinou ve formě počtu period, uložených v daném souboru). Výčet funkcí obsažených v knihovně DAL a určených k importu dat:

```
Generate_3f      (Fs, f, periods, harms[], phis[], ubal)
```

```
Generate_1f      (Fs, f, periods, harms[], phi)
```

```
EnvisOscillogramXML_3f  (FName, begin, end, column)
```

```

EnvisOscillogramCSV_3f      (FName)
SimonData_1f               (FName, periods)
SMPQdata_xls3f             (FName, periods)
SMPQdataCXI_xls3f          (FName, tenPeriods)
JoinSMPQdata_xls3f          (BaseFName, NoPeriods[])
JoinSMPQdataCXI_xls3f       (BaseFName, NoTenPeriods[])
DistLib_3f_star            (FName)
DistLib_3f_delta           (FName)

```

Ukázka použití funkce `JoinSMPQdata_xls3f()` k importu dat:

```

FPath = '../..'/data/TK3/';
Measurement = 'PC1';
FName = 'TK3-' + Measurement + '-GO';
BaseFName = FPath + FName;
NoPeriods = [3000, 3000];
data = JoinSMPQdata_xls3f(BaseFName, NoPeriods);

```

Po provedení příslušné analýzy skript zajistí uložení vypočtených výkonů do CSV souborů ve složce, kde byla umístěna původní data. Dalším krokem je vygenerování grafického výstupu. Příslušné skripty se nacházejí ve složce Graphics. V každém skriptu je potřeba zajistit načtení jak analyzovaných výkonů (pomocí funkce `ReadPowersCSV(FName)`), tak surových oscilogramů (pokud mají být součástí zobrazení). Ve skriptech s grafickým výstupem je implementována možnost výřezu zobrazovaných dat; děje se tak nastavením proměnných např.:

```

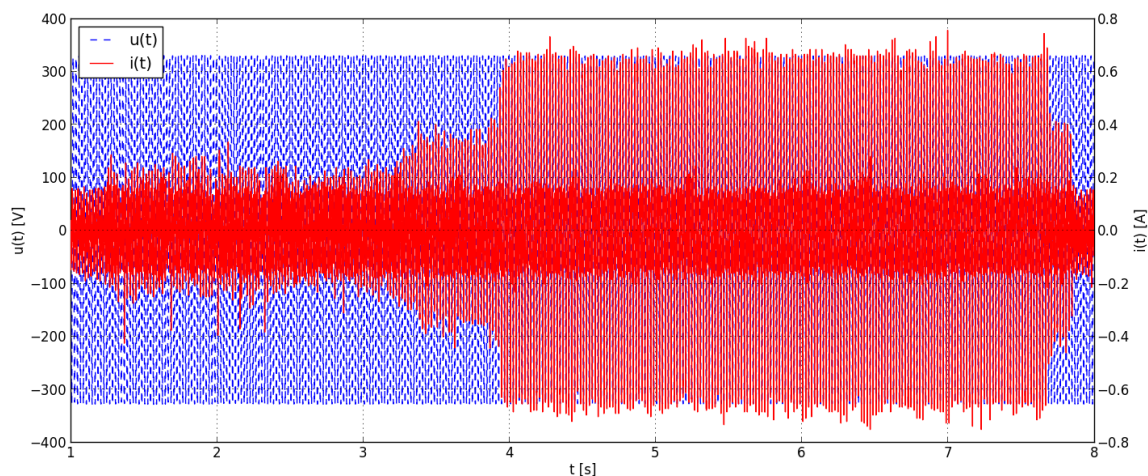
Tbegin = 1.2;
Tend = 1.8;

```

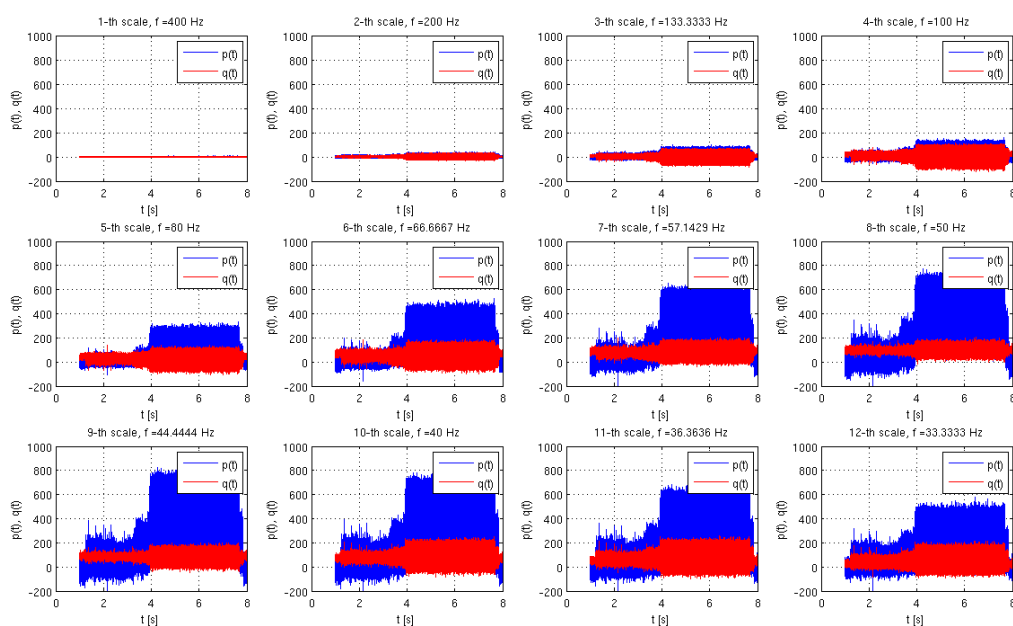
Nastavení proměnné `Tend` na hodnotu -1 zobrazí data až do konce.

C Analýza spuštění LCD monitoru - 1 fáze

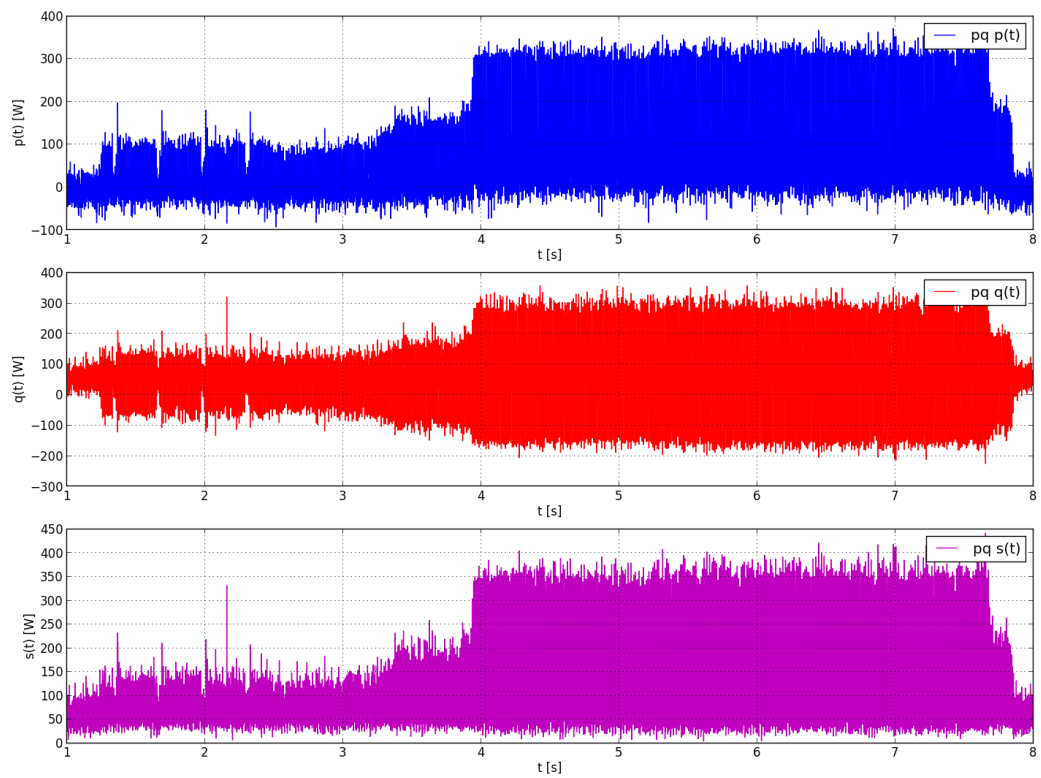
Toto měření bylo podrobněji popsáno v kap. 4.1. Viz též obr. 19. V této příloze jsou tato data analyzována zbylými nástroji.



Obrázek 22: Data monitor - 1f oscilogram

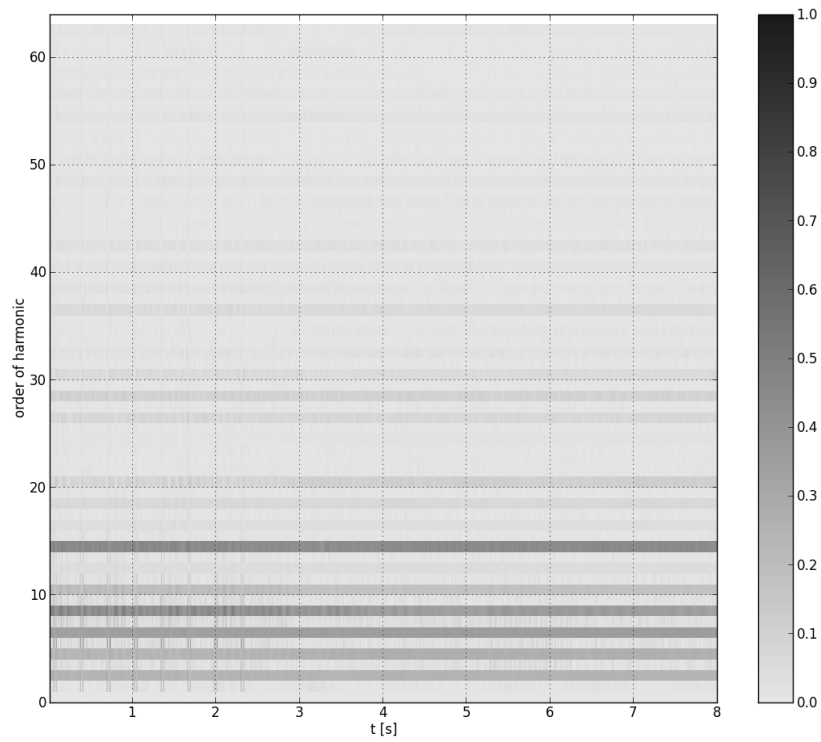


Obrázek 23: Data monitor - definice CWT

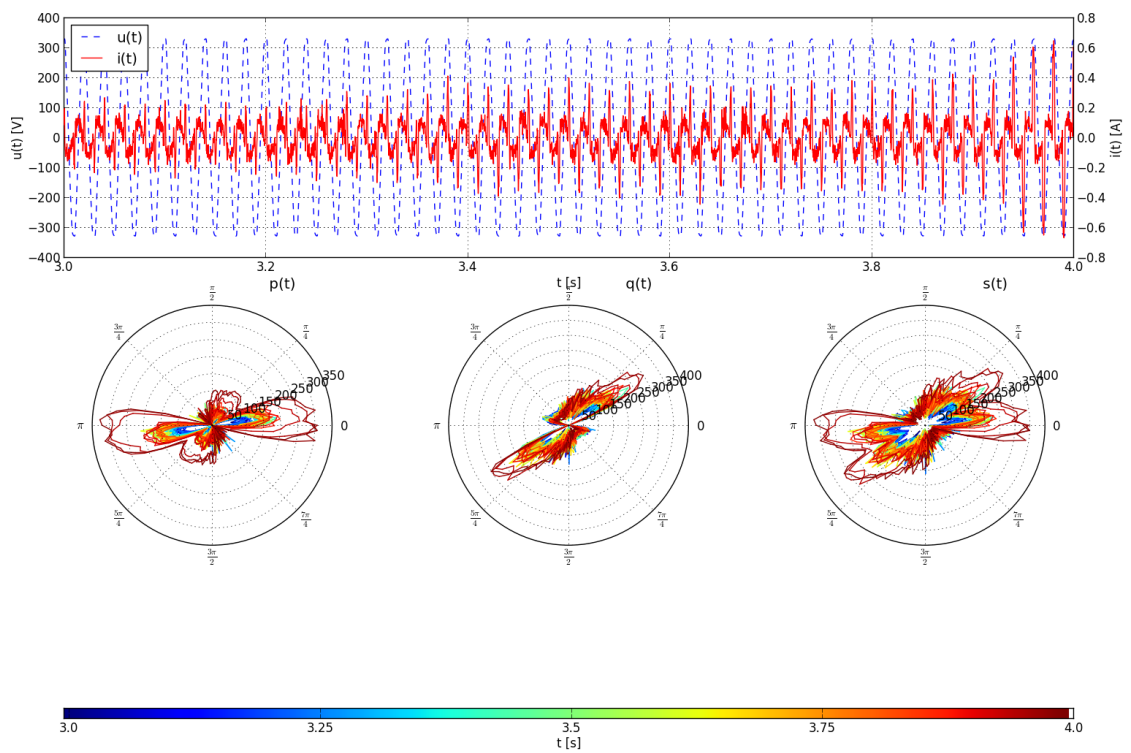


Obrázek 24: Data monitor - definice p-q

Spectrogram - U, normalized to PQ requirements

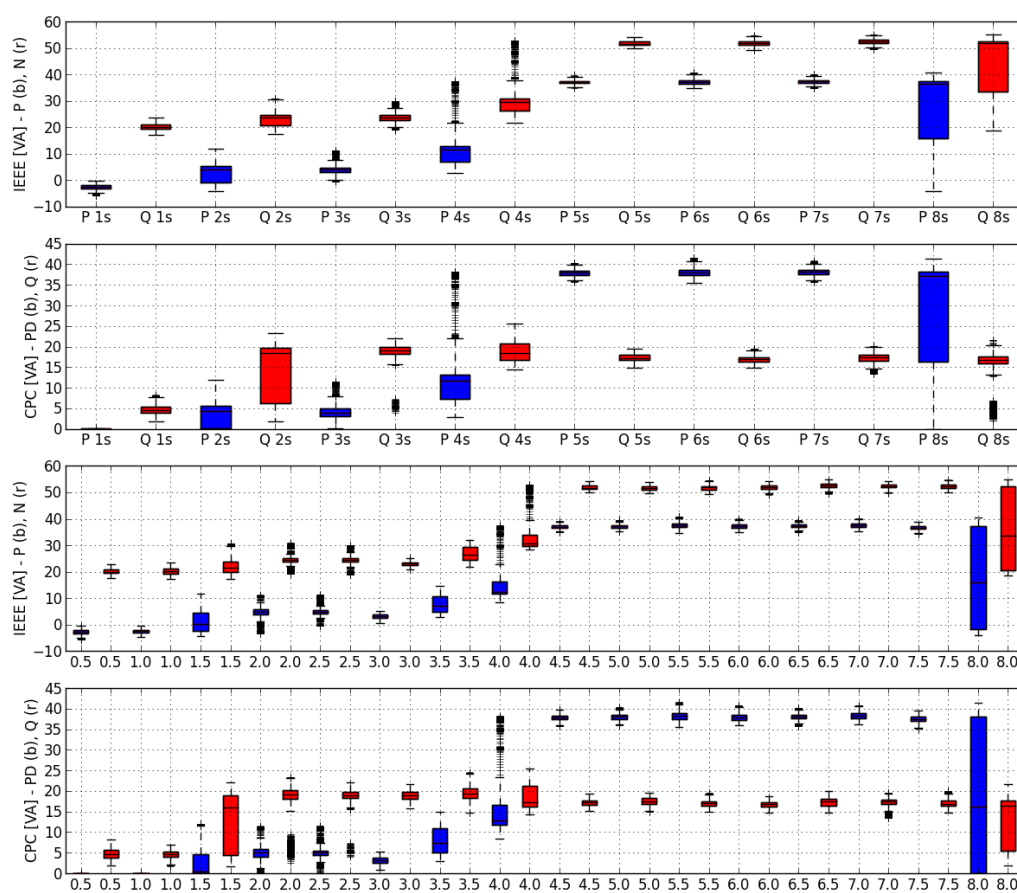


Obrázek 25: Data monitor - spektrogram podle PQ



Obrázek 26: Data monitor - definice p-q, polární grafy, výřez $t = 3-4$ s

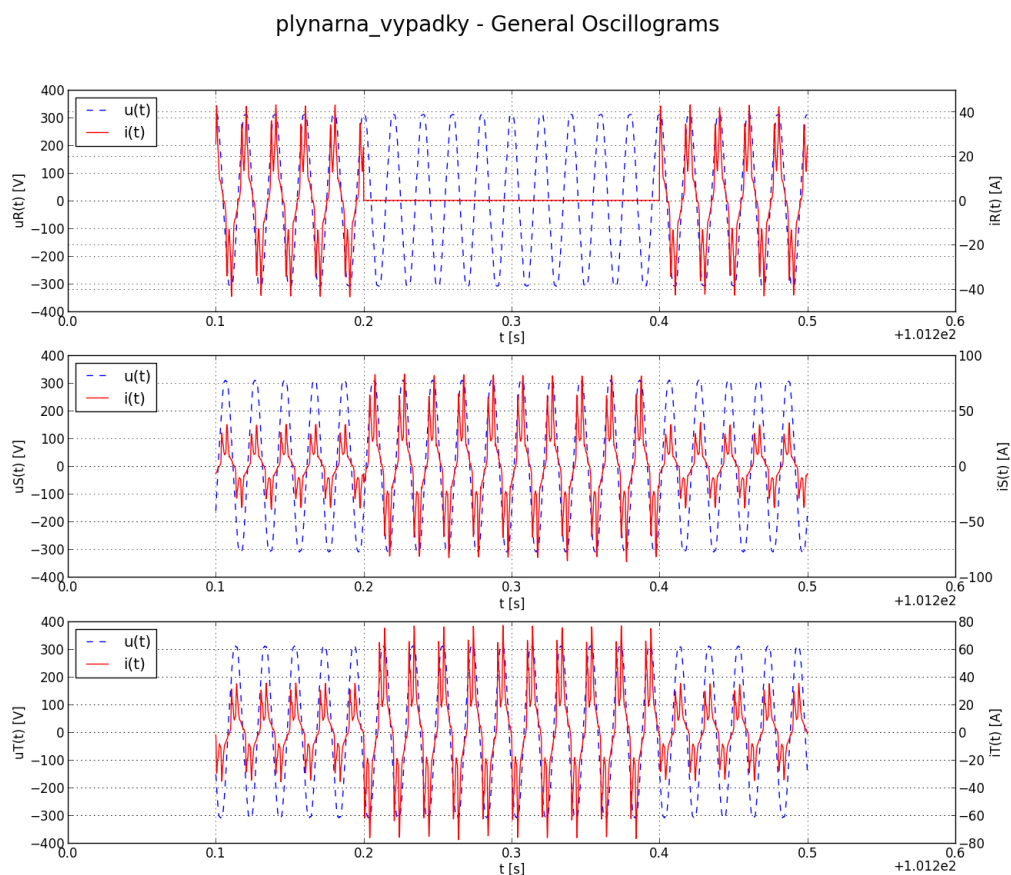
Porovnání průběhu výkonu - boxplot, agregace po 1/0.5 s



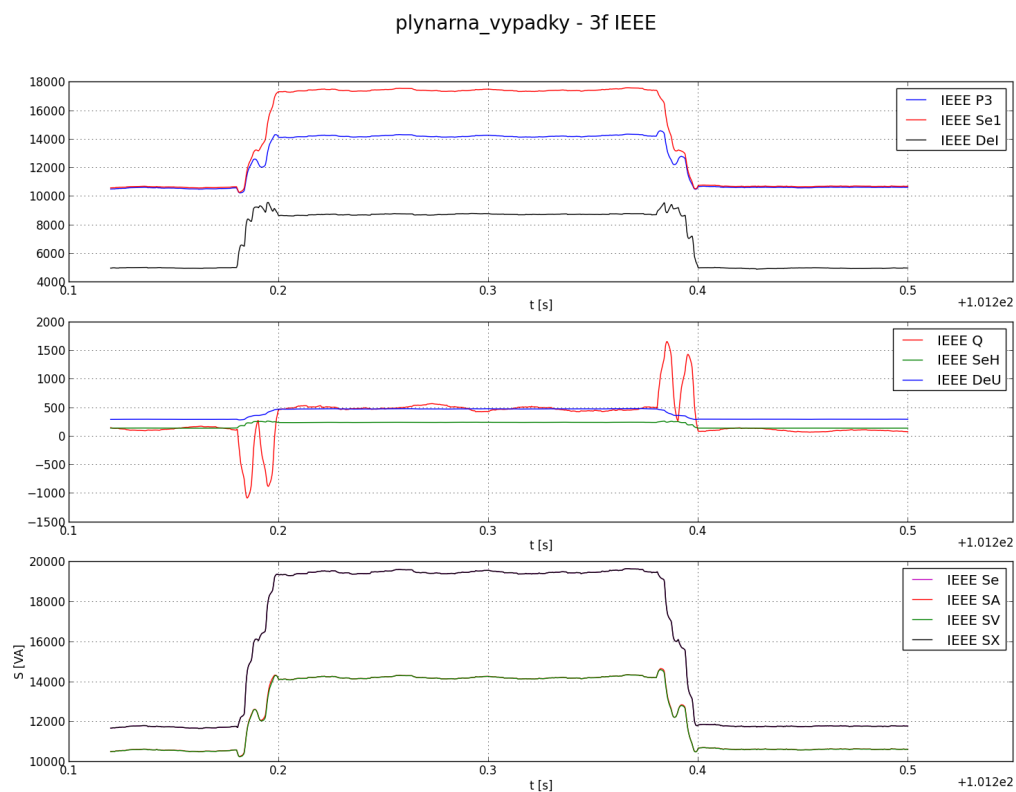
Obrázek 27: Data monitor - definice IEEE a CPC, boxplot zobrazení

D Analýza výpadku jedné fáze - 3 fáze

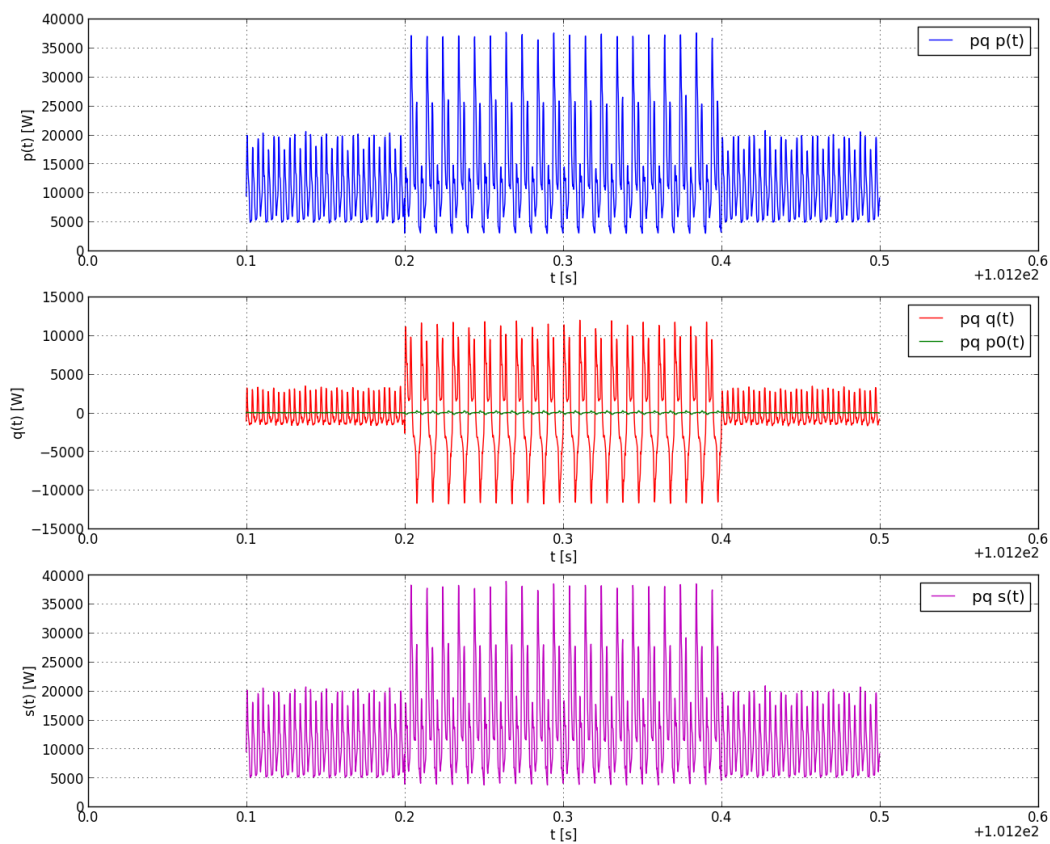
Naměřená data pocházejí z plynárny u budovy L ústavu CxI. Z oscilogramu je patrné, že zde došlo (a opakovaně dochází) k výpadku odběru proudu na jedné fázi, což se projeví na zvýšeném odběru proudu zbylých dvou fází. Tato data viz též spektrogram na obr. 10, kde je analyzováno napětí první fáze.



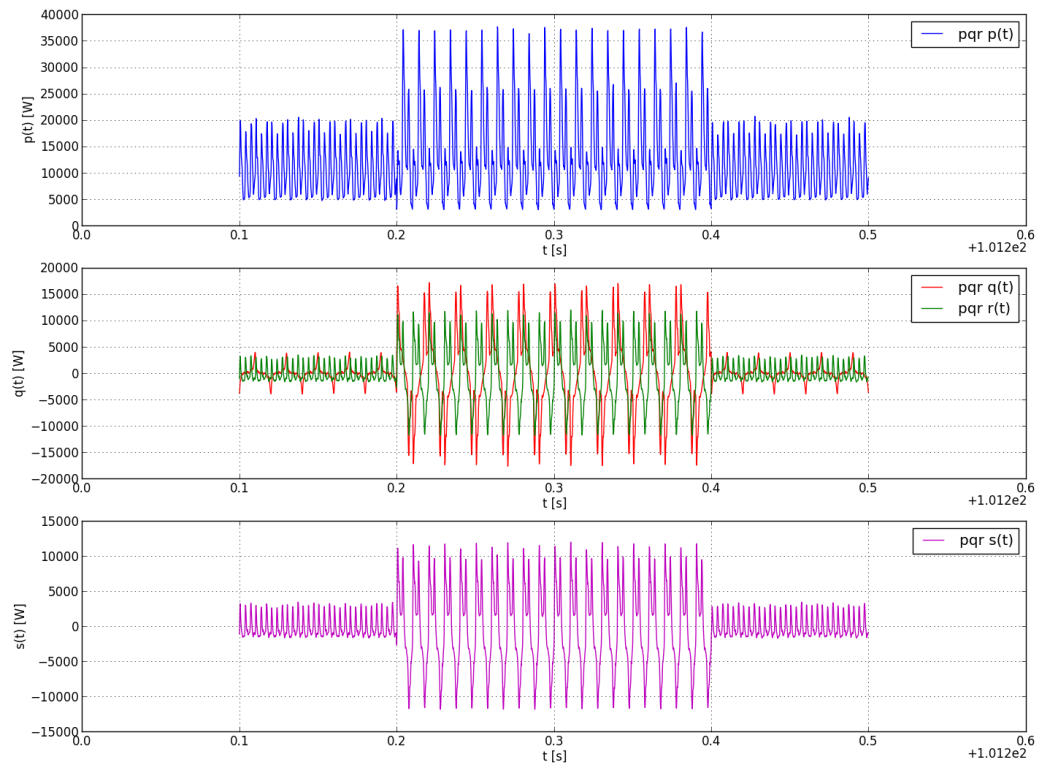
Obrázek 28: Data plynárna - 3f oscilogramy



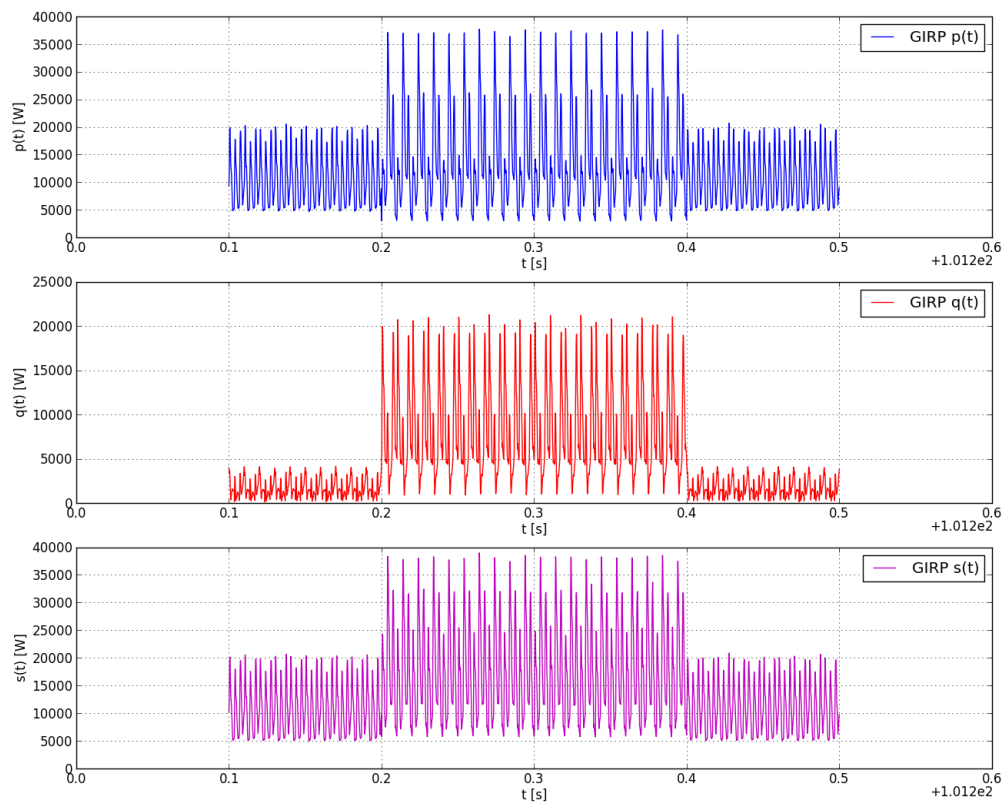
Obrázek 29: Data plynárna - definice IEEE



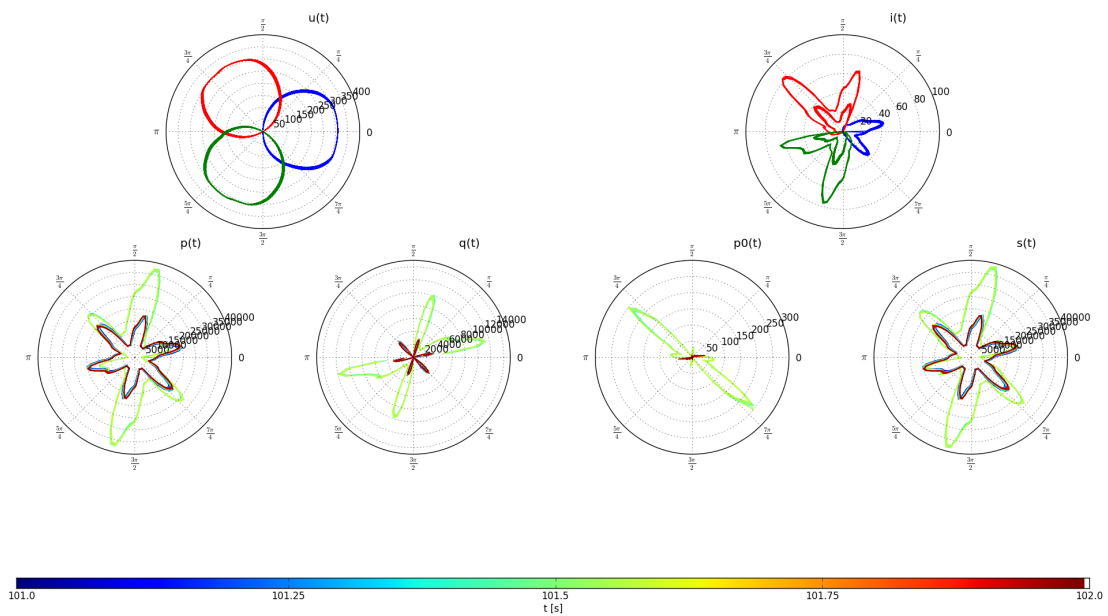
Obrázek 30: Data plynárna - definice p-q



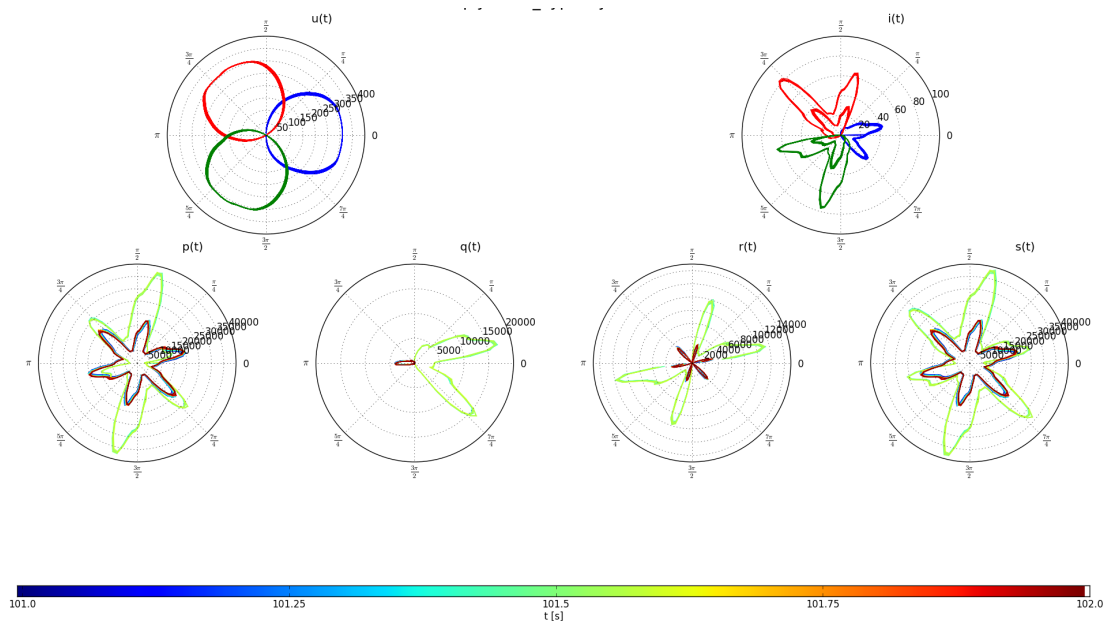
Obrázek 31: Data plynárna - definice p-q-r



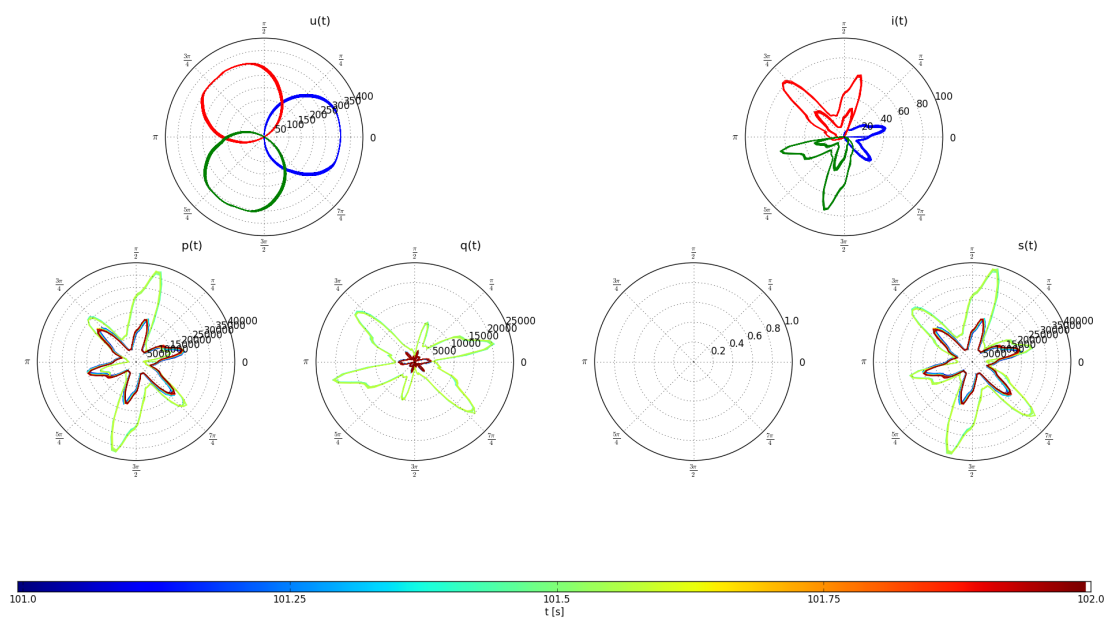
Obrázek 32: Data plynárna - definice GIRP



Obrázek 33: Data plynárna - definice p-q, polární grafy



Obrázek 34: Data plynárna - definice p-q-r, polární grafy



Obrázek 35: Data plynárna - definice GIRP, polární grafy